

Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

“Desarrollo de un prototipo de un molde para la fabricación de plastiflechas biodegradables en el etiquetado y exportación de frutas”

Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Materiales con el grado académico de Licenciatura.

Realizado por: Melanny Vanessa Bonilla Soto.

Profesor(a) Guía: Ing. Rebeca Corrales Brenes.

Profesor Lector: M.Sc Adrián Quesada Martínez.

Profesor Lector: PhD. Jorge Cubero Sesin.

Asesor Industrial: PhD. Ernesto Villegas Villegas.

Cartago, 18 noviembre 2024

Carrera Acreditada por la Agencia de Acreditación de Programas de Ingeniería y Arquitectura



Resumen

Bonilla Soto, Melanny Vanessa. Noviembre, 2024. Desarrollo de un prototipo de un molde para la fabricación de plastiflechas biodegradables en el etiquetado y exportación de frutas. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesora Asesora: Rebeca Corrales Brenes. Este proyecto fue desarrollado en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) de Costa Rica. El objetivo del proyecto consistió en diseñar y fabricar un molde que permita la producción de plastiflechas biodegradables, empleadas en el etiquetado de frutas para la exportación. Estas plastiflechas están fabricadas a partir de residuos agrícolas combinados con un biopolímero compatible, con el objetivo de reducir la contaminación provocada por plásticos convencionales de un solo uso. Se analizaron las propiedades de los materiales, se realizaron simulaciones computacionales con Moldex3D y se prototipó el molde mediante técnicas como la impresión 3D. Finalmente, se seleccionó una configuración óptima basada en criterios de sostenibilidad, viabilidad económica y desempeño mecánico, logrando un diseño que cumple con las normativas ambientales internacionales y garantiza una solución efectiva y sostenible para la industria agrícola costarricense.

ABSTRACT

This project was developed at the National Nanotechnology Laboratory (LANOTEC) of the National High Technology Center (CeNAT) of Costa Rica. The objective of the project was to design and manufacture a mold for the production of biodegradable plastic arrows used for labeling fruit for export. These plastiflirts are made from agricultural waste combined with a compatible biopolymer, in order to reduce the contamination caused by conventional single-use plastics. Material properties were analyzed, computational simulations were performed with Moldex3D and the mold was prototyped using techniques such as 3D printing. Finally, an optimal configuration was selected based on criteria of sustainability, economic viability and mechanical performance, achieving a design that complies with international environmental regulations and guarantees an effective and sustainable solution for the Costa Rican agricultural industry.

ACTA DE ENTREGA DEL INFORME FINAL DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Se certifica que se ha recibido el Informe Final del Proyecto de Graduación, realizado por la estudiante Melanny Vanessa Bonilla Soto, carné 2018084209, la cual se titula: “Desarrollo de un prototipo de un molde para la fabricación de plastiflechas biodegradables en el etiquetado y exportación de frutas” y que se realizó en la empresa “Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC)”, durante el II Semestre de 2024.

El Proyecto Final de Graduación es un requisito académico del Programa de Bachiller en Ingeniería en Materiales de la Escuela de en Ciencia e Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento ha sido declarado:

Públicos

Confidenciales

Ing. Rebeca Corrales Brenes
Profesor Guía



Melanny Vanessa Bonilla Soto
Estudiante

M.Sc. Adrián Quesada Martínez
Profesor Lector

Ph.D. Jorge Cubero Sesin
Profesor Lector

M.Sc. Ricardo Esquivel Isern
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Cartago, 18 de noviembre de 2024

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

El presente Proyecto Final de Graduación titulado “Desarrollo de un prototipo de un molde para la fabricación de plastiflechas biodegradables en el etiquetado y exportación de frutas” y realizado en la empresa “Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC)”, durante el II Semestre de 2024, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores Rebeca Corrales Brenes, Adrián Quesada Martínez, Jorge Cubero Sesin; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

Confidenciales

Ing. Rebeca Corrales Brenes
Profesor Guía



Melanny Vanessa Bonilla Soto
Estudiante

M.Sc. Adrián Quesada Martínez
Profesor Lector

Ph.D. Jorge Cubero Sesin
Profesor Lector

M.Sc. Ricardo Esquivel Isern
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Cartago, 18 de noviembre de 2024

CARTA DE ENTENDIMIENTO

Señores

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Melanny Vanessa Bonilla Soto carné 2018084209, autorizo (X) no autorizo () a la Biblioteca José Figueres del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título “Desarrollo de un prototipo de un molde para la fabricación de plastiflechas biodegradables en el etiquetado y exportación de frutas” para ser ubicado en el Repositorio institucional y Catálogo SIBITEC para ser accedido a través de la red Internet.

 305150732
Firma de estudiante
Cédula

AGRADECIMIENTO

Quiero dejar patente mi agradecimiento. En primer lugar, agradezco a Dios por ser mi guía constante, por no dejarme sola y mostrarme siempre una salida en los momentos difíciles, enseñándome a ver el lado positivo de las cosas.

Agradezco también al LANOTEC, por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto junto a su equipo, que me ha dado valiosas enseñanzas a lo largo del proceso y ha enriquecido mi experiencia profesional y personal.

A mis profesores, quienes han sido pilares fundamentales en este camino, mis más sinceros agradecimientos. En primer lugar, a mi profesora guía, Rebeca Corrales Brenes, cuya paciencia, apoyo y motivación han sido clave para completar cada etapa de este proyecto. Gracias por estar presente en cada paso, orientándome con dedicación y asegurándose de que nunca me sintiera sola en este desafío. Al profesor Alfredo Rodríguez Rojas, le agradezco de corazón por su disponibilidad constante, su paciencia y por los sabios consejos que me brindó en cada reunión. Gracias a ustedes, pude avanzar y culminar con éxito este proyecto.

Además, quiero agradecer a mis compañeros de la universidad, quienes también han sido fundamentales en este camino. Gracias por el apoyo, por las noches de desvelo mientras estudiábamos juntos, y por enseñarme el verdadero valor del trabajo en equipo y el compañerismo. Agradezco especialmente a Feli y a Sebas por su amistad y por estar siempre a mi lado.

Por último, pero no menos importante, mi gratitud infinita a mi familia. Su amor, paciencia y comprensión me han acompañado a lo largo de la vida y en este proyecto, que también es suyo. A mi papá, Gerardo, por sus consejos y su orientación, y a mi mamá, Mariela, por ser mi cómplice y compañera en cada momento. A mi hermano, Gerardito, por su apoyo incondicional y por acompañarme en este proceso, haciendo más ligero el camino. Los amo con todo mi corazón, y sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

Se lo dedico:

*A Dios, por guiarme en cada paso de mi camino,
dándome sabiduría y fortaleza cuando más
lo necesitaba. A mis padres, por ser mi apoyo
incondicional y estar conmigo en cada uno
de mis pasos desde el primer día en este mundo.
Su amor y aliento han sido la base sobre la que he
construido mis sueños; sin ustedes, nada de esto sería
posible. A mi hermano, por siempre creer en mí
y por darme la fuerza para seguir adelante en cada
momento. Y a mis perritos, que con su compañía fiel
han estado a mi lado en los momentos más difíciles,
recordándome siempre el valor de la lealtad y
el amor incondicional.*

*La naturaleza ya ha resuelto muchos de
los problemas a los que nos enfrentamos.*

Sólo tenemos que aprender de ella.

-Janine Benyus

Índice general

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 | 13 |
| Introducción | 13 |
| 1.1. Identificación de la empresa | 13 |
| 1.1.1. Historia..... | 13 |
| 1.1.2. Misión | 13 |
| 1.1.3. Visión | 13 |
| 1.2. Justificación del trabajo | 14 |
| 1.2.1. Antecedentes del proyecto | 14 |
| 1.2.2. Justificación | 14 |
| 1.2.3. Planteamiento del problema..... | 15 |
| 1.3. Impacto social y ambiental | 15 |
| 1.3.1. Impacto social | 16 |
| 1.3.2. Impacto ambiental..... | 16 |
| 1.4. Objetivo General..... | 17 |
| 1.5. Objetivos Específicos | 17 |
| 1.6. Alcances y limitaciones | 18 |
| 1.6.1. Alcances | 18 |
| 1.6.2. Limitaciones..... | 18 |
| Capítulo 2 | 20 |
| Marco teórico | 20 |
| 2.2. Biopolímeros y materiales biodegradables..... | 22 |
| 2.3. Diseño y fabricación de moldes | 26 |
| 2.4. Procesos de moldeo..... | 30 |
| 2.4.1. Técnica de moldeo por inyección..... | 31 |
| 2.5. Normativas y regulaciones internacionales sobre materiales biodegradables..... | 34 |
| 2.6. Implicaciones económicas y sociales..... | 36 |
| Capítulo 3 | 38 |
| Metodología del proyecto | 38 |
| 3.1. Análisis de materiales y especificaciones del molde..... | 38 |
| 3.1.1. Identificación de las características del material biodegradable | 38 |
| 3.1.2. Revisión de normativas aplicables | 38 |
| 3.1.3. Definición de parámetros de procesamiento | 39 |

| | |
|---|-----------|
| | 10 |
| 3.1.4. Establecimiento de condiciones de enfriamiento y desmoldeo | 39 |
| 3.2. Diseño del molde mediante simulaciones computacionales | 40 |
| 3.2.1. Recopilación de información sobre dimensiones y configuraciones del molde | 40 |
| 3.2.2. Diseño de la geometría y dimensiones del molde en CAD | 40 |
| 3.2.3. Simulaciones computacionales para optimizar el proceso de llenado | 40 |
| 3.3. Prototipado del molde | 41 |
| 3.3.1. Determinación del proceso de fabricación más eficiente para el molde | 41 |
| 3.3.2. Selección de materiales adecuados para la fabricación del molde | 41 |
| 3.3.3. Fabricación del prototipo del molde utilizando técnicas como impresión 3D | 42 |
| 3.3.4. Ensamble del prototipo del molde | 42 |
| 3.4. Evaluación de la viabilidad económica y escalamiento | 42 |
| 3.4.1. Realización de un análisis detallado de los costos asociados a la fabricación del molde y del producto final | 42 |
| Capítulo 4 | 43 |
| Resultados y análisis | 43 |
| 4.1. Criterio de selección de polímeros | 43 |
| 4.1.1. Evaluación de propiedades | 43 |
| 4.1.2. Compatibilidad de polímeros | 45 |
| 4.2. Análisis de las especificaciones del molde | 47 |
| 4.3. Simulaciones computacionales | 48 |
| 4.3.1. Propuestas de diseño para el conjunto de plastiflechas biodegradables | 48 |
| 4.3.2. Resultados de las simulaciones computacionales | 50 |
| 4.3.2.1 Propuestas | 50 |
| 4.4. Diseño del molde | 60 |
| 4.5. Fabricación del prototipo del molde | 62 |
| 4.5.1. Proceso de fabricación para el molde | 63 |
| 4.5.2. Selección de materiales para la fabricación del molde | 64 |
| 4.6. Evaluación de los costos de producción | 65 |
| 4.6.1. Identificar los costos de materiales | 65 |
| 4.6.2. Costos fijos y variables | 66 |
| 4.7. Impacto de la implementación y viabilidad | 69 |
| Capítulo 5 | 70 |
| Conclusiones y recomendaciones | 70 |
| 5.1. Conclusiones | 70 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 5.2. Recomendaciones..... | 71 |
| Referencias bibliográficas | 72 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Comparación de propiedades mecánicas y térmicas de los biopolímeros seleccionados (PLA, Ecovio y Ecoflex) [16-19]. | 25 |
| Tabla 2. Evaluación Multicriterio (MCDM) para determinar el rendimiento de la fabricación de plastiflechas biodegradables [Elaboración propia]. | 47 |
| Tabla 3. Comparación de parámetros establecidos para PLA, Ecoflex® F Blend C1200 y Ecovio® [Elaboración propia]. | 51 |
| Tabla 4. Resumen de los resultados de las simulaciones de los tres biopolímeros (PLA, Ecoflex y Ecovio) [Elaboración propia]. | 59 |
| Tabla 5. Evaluación Multicriterio (MCDM) para determinar la opción más eficiente en términos de tecnología de fabricación [Elaboración propia]. | 64 |
| Tabla 6. Tabla resumen de costos fijos y variables [Elaboración propia]. | 68 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Modelo de economía circular [Elaboración propia]. | 21 |
| Figura 2. Conjunto de plastiflechas [23]. | 28 |
| Figura 3. Diagrama de moldeo por inyección [32]. | 31 |
| Figura 4. Modelo de moldeo por inyección neumático de escritorio [34]. | 33 |
| Figura 5. Análisis FODA de los aspectos más relevantes para el análisis de compatibilidad de los biopolímeros [Elaboración propia]. | 46 |
| Figura 6. Diseño del conjunto de plastiflechas (a) Propuesta 1 (b) Propuesta 2 [Elaboración propia]. | 49 |
| Figura 7. Modelo (a) Propuesta 1 (b) Propuesta 2 [Elaboración propia]. | 50 |
| Figura 8. Componentes del molde (a) Pieza A (b) Pieza B [Elaboración propia]. | 61 |
| Figura 9. Vista interna del molde [Elaboración propia]. | 61 |
| Figura 10. Croquis del molde [Elaboración propia]. | 62 |
| Figura 11. Gráfico de temperatura de llenado vs tiempo de llenado de los biopolímeros seleccionado (PLA, Ecoflex y Ecovio) [Elaboración propia]. | 76 |
| Figura 12. Tiempo y temperatura de llenado del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]. | 77 |
| Figura 13. Tiempo y temperatura de llenado del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]. | 78 |
| Figura 14. Presión de llenado del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]. | 78 |

| | |
|---|----|
| Figura 15. Presión de llenado del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 79 |
| Figura 16. Velocidad de llenado del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecovio (c) Ecoflex [Elaboración propia]..... | 80 |
| Figura 17. Velocidad de llenado del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 81 |
| Figura 18. Temperatura de compactación prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 81 |
| Figura 19. Fuerza de cierre prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 82 |
| Figura 20. Temperatura de compactación prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 83 |
| Figura 21. Fuerza de cierre prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 83 |
| Figura 22. Desplazamiento en los ejes X, Y y Z del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 84 |
| Figura 23. Desplazamiento en los ejes X, Y y Z del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 85 |
| Figura 24. Temperatura de enfriamiento del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 85 |
| Figura 25. Temperatura de enfriamiento del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia]..... | 86 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Identificación de la empresa

1.1.1. Historia

El Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) fue fundado en el 2004 como parte del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) en Costa Rica. Desde su creación, LANOTEC se ha dedicado a la investigación y desarrollo en el campo de la nanotecnología, contribuyendo significativamente al avance de las tecnologías emergentes en el país. A lo largo de los años, LANOTEC ha colaborado con diversas instituciones académicas, industriales y gubernamentales para impulsar proyectos innovadores y sostenibles que beneficien a la sociedad costarricense y al mundo.

1.1.2. Misión

La misión de LANOTEC es fomentar la investigación, el desarrollo y la aplicación de la nanotecnología para mejorar la calidad de vida, promover el desarrollo sostenible y fortalecer la competitividad industrial en Costa Rica. LANOTEC se dedica a la creación de soluciones tecnológicas avanzadas que aborden los desafíos globales y locales, a través de la excelencia en la investigación científica, la formación de recursos humanos altamente calificados y la colaboración interdisciplinaria.

1.1.3. Visión

El LANOTEC aspira a ser un laboratorio de investigación autosustentable de alto impacto económico a nivel nacional e internacional, que aporta en la generación de conocimiento en materia de nanobiotecnología, siendo líder en el fortalecimiento del desarrollo competitivo y la articulación intersectorial. Además, el LANOTEC ansía a ser un centro de referencia mundial en investigación y desarrollo en nanotecnología, reconocido por su innovación, impacto y liderazgo en la generación de conocimiento y soluciones tecnológicas. La visión de LANOTEC incluye la creación de un entorno de investigación colaborativo que fomente la creatividad y la excelencia, impulsando el

crecimiento económico y el bienestar social mediante el uso responsable y sostenible de la nanotecnología.

1.2. Justificación del trabajo

1.2.1. Antecedentes del proyecto

El Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) se dedica a la investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras que promuevan la sostenibilidad y el avance científico. Por eso, surge el interés en los desechos plásticos, que representan una amenaza significativa para el medio ambiente, con una producción mundial que supera los 500 millones de toneladas anuales y una tasa de reciclaje inferior al 10%.

Este proyecto busca abordar esta problemática mediante la creación de plastiflechas biodegradables, esto debido a que existen leyes actuales que prohíben el uso de plásticos de un solo uso, como Ley N°9786 en Costa Rica, que regula y prohíbe productos como pajillas, platos y vasos desechables, y, otros materiales que tienen un alto impacto ambiental [1]. Además, en la Unión Europea, la Directiva 2019/904 sobre plásticos de un solo uso prohíbe desde julio de 2021 la comercialización de varios productos con este tipo de plásticos, promoviendo el uso de alternativas sostenibles [2]. Estas normativas buscan reducir la contaminación plástica e incentivar el uso de materiales biodegradables. Del mismo modo, esto promueve el aprovechamiento de los avances en nanobiotecnología y biopolímeros.

Este estudio se realizó en estrecha colaboración con el proyecto BioTag, una iniciativa orientada al desarrollo de soluciones sostenibles para la industria agrícola. Como parte de esta colaboración, BioTag podrá hacer uso del diseño y de las modificaciones realizadas en este proyecto, permitiendo así su adaptación y optimización para futuras aplicaciones.

1.2.2. Justificación

Costa Rica es un líder mundial en la exportación de productos agrícolas, como la piña y el banano, industrias que generan una considerable cantidad de residuos. Este proyecto no solo utiliza estos residuos para crear biopolímeros, sino que también ofrece una

solución innovadora para el etiquetado de frutas, apoyando a la industria agrícola y promoviendo prácticas más sostenibles. Además, la implementación de este proyecto tiene beneficios económicos y sociales, al generar nuevas oportunidades de empleo, especialmente para mujeres en zonas rurales, y fortaleciendo la competitividad del sector exportador costarricense. La alineación con las políticas institucionales y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el ODS 12: Producción y consumo responsables, el ODS 13: Acción por el clima y el ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico [3], refuerza la relevancia y necesidad de este proyecto, contribuyendo a un desarrollo más sostenible y justo.

1.2.3. Planteamiento del problema

El problema principal que aborda este proyecto es la contaminación ambiental causada por los desechos plásticos, entre los cuales se incluyen las plastiflechas. Estas se utilizan en grandes cantidades en la industria agrícola para el etiquetado de frutas, y debido a que son de un solo uso, terminan convirtiéndose en un desecho plástico que contribuye a la contaminación del ambiente. Se estima que el uso de productos plásticos en la agricultura alcanzó los 12,5 millones de toneladas a nivel global, abarcando plantaciones, producción animal y otros sectores relacionados [4], lo que representa una fuente significativa de desechos plásticos que no se gestionan adecuadamente. Adicionalmente, la industria agrícola de Costa Rica genera grandes cantidades de residuos, dentro de estos el rastrojo de piña, que produce más de 10 millones de toneladas de este subproducto en cada cosecha (cada 18 meses) [5], esto representa una oportunidad desaprovechada para la creación de valor agregado. Este proyecto se propone resolver estos problemas mediante el desarrollo de plastiflechas biodegradables, aprovechando los residuos agrícolas y promoviendo una alternativa sostenible y económica para el etiquetado de frutas.

1.3. Impacto social y ambiental

En esta sección se analizarán los efectos del proyecto en el ámbito social y ambiental. Se destacarán los beneficios sociales, como la generación de empleo y el empoderamiento de comunidades rurales, así como la promoción de una cultura de sostenibilidad. Además, se evaluará el impacto ambiental positivo del proyecto, incluyendo la reducción de

desechos plásticos y la implementación de prácticas sostenibles en la industria del etiquetado de frutas. Estos aspectos subrayan la relevancia y necesidad del proyecto en contribuir a un desarrollo más responsable y sostenible.

1.3.1. Impacto social

El proyecto de plastiflechas biodegradables también generará un impacto social positivo. La creación de nuevas oportunidades de empleo, particularmente para mujeres, es un componente central de este proyecto. Al fomentar la participación de estas comunidades en la producción y distribución de plastiflechas, se promueve la inclusión social y el empoderamiento económico. Esta iniciativa no solo mejora la calidad de vida de los individuos involucrados, sino que también fortalece la cohesión social y el desarrollo comunitario.

Además, el proyecto contribuye a la educación y concienciación sobre la importancia de la sostenibilidad y la gestión adecuada de los residuos. Al integrar diferentes actores del sector público, privado y académico, se crea una plataforma de colaboración que facilita el intercambio de conocimientos y mejores prácticas. Este enfoque participativo asegura que los beneficios del proyecto se extiendan más allá de los impactos económicos directos, promoviendo una cultura de responsabilidad ambiental y social en toda la sociedad costarricense, y fortaleciendo las relaciones comerciales internacionales. Al exportar este producto sostenible a Europa, el proyecto no solo cumple con las estrictas normativas ambientales del mercado europeo, sino que también posiciona a Costa Rica como un líder en innovación sostenible, mejorando su imagen y competitividad en el mercado global.

1.3.2. Impacto ambiental

El desarrollo y utilización de plastiflechas biodegradables tendrá un impacto significativo en la reducción de la contaminación plástica; al sustituir las plastiflechas convencionales de un solo uso por alternativas biodegradables, se disminuirá considerablemente la cantidad de plástico que termina en vertederos y océanos. Esto contribuye directamente a la mitigación del problema global de los desechos plásticos, promoviendo un entorno más limpio y saludable. Además, el uso de biopolímeros

derivados de residuos agrícolas ayuda a cerrar el ciclo de vida de estos materiales, al transformar lo que sería un desecho en un recurso valioso.

Adicionalmente, este proyecto fomenta la adopción de prácticas sostenibles en la industria del etiquetado de frutas, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular con el ODS 12: Producción y consumo responsables, y el ODS 13: Acción por el clima, así como también con las políticas ambientales de Costa Rica. La implementación de tecnologías que minimizan el impacto ambiental y promueven la economía circular es esencial para proteger la biodiversidad y los ecosistemas naturales. En un contexto donde la producción agrícola es una actividad clave, se resalta la cantidad de rastrojo de piña que se genera en cada cosecha, pues alcanza los 10 millones de toneladas. Este valor tan elevado subraya la importancia de la economía circular en este proyecto, haciendo del rastrojo de piña una materia prima clave para la creación de biopolímeros biodegradables. Esto destaca cómo la innovación puede armonizar el desarrollo económico con la preservación del medio ambiente. Además, al exportar este producto a Europa, se demuestra el compromiso de Costa Rica con la sostenibilidad global, cumpliendo con las exigencias del mercado europeo y promoviendo una economía más responsable y respetuosa con el medio ambiente.

1.4. Objetivo General

Diseñar un molde que permita la producción de plastiflechas biodegradables para su utilización en el etiquetado de fruta nacional para exportación, cumpliendo con los estándares de calidad y normativas vigentes.

1.5. Objetivos Específicos

1. Establecer los requisitos y parámetros necesarios para el diseño de un molde que permita la producción de plastiflechas biodegradables.
2. Diseñar el molde utilizando software CAD con sus respectivas simulaciones computacionales para verificar y optimizar el proceso de fabricación de las plastiflechas biodegradables.
3. Implementar un prototipo de un molde que permita la fabricación de un conjunto de plastiflechas biodegradables, adaptados al sistema de etiquetado de frutas.

4. Determinar la viabilidad de los costos asociados a la fabricación del molde y del producto final.

1.6. Alcances y limitaciones

En esta sección se analizarán los alcances y limitaciones del proyecto de desarrollo de un molde para la producción de plastiflechas biodegradables. Se describirán las metas y beneficios esperados, tales como la reducción de desechos plásticos y el apoyo a la industria agrícola costarricense, así como la creación de nuevas oportunidades de empleo. Asimismo, se identificarán las posibles restricciones y desafíos que podrían surgir, incluyendo limitaciones financieras, tecnológicas y normativas. Esta evaluación proporcionará una comprensión clara de las fortalezas del proyecto y de los obstáculos que deben superarse para su éxito y sostenibilidad a largo plazo.

1.6.1. Alcances

- **Investigación y desarrollo:** El proyecto incluye la investigación de materiales biodegradables y el diseño de un molde asistido por computadora (CAD) optimizado para la producción de plastiflechas biodegradables.
- **Sostenibilidad ambiental:** El proyecto contribuirá a la reducción significativa de desechos plásticos de un solo uso en la industria agrícola costarricense, ayudando a minimizar la contaminación de océanos y vertederos.
- **Innovación en el etiquetado de frutas:** La creación de una solución biodegradable y sostenible para el etiquetado de frutas fortalecerá la competitividad de los exportadores de frutas de Costa Rica.
- **Impacto social:** Generación de nuevas oportunidades de empleo en zonas rurales, promoviendo la inclusión social y el empoderamiento económico en las comunidades involucradas en la producción y distribución de las plastiflechas.

1.6.2. Limitaciones

- **Recursos:** El acceso a materiales adecuados y la inversión en tecnología avanzada para la fabricación de moldes y simulaciones computacionales podrían ser limitantes importantes.

- **Colaboración:** El éxito del proyecto depende de la colaboración efectiva entre el sector público, privado y académico. La falta de coordinación podría ralentizar el desarrollo.
- **Cumplimiento de normativas:** La exportación a Europa implica cumplir con estrictas normativas ambientales y de calidad, lo cual puede ser costoso y complejo.
- **Aceptación del mercado:** La adopción de productos biodegradables requiere un esfuerzo significativo en marketing y educación para cambiar las percepciones y hábitos de los consumidores.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo, se abarcarán conceptos teóricos clave, que fundamentan el desarrollo del proyecto. Se abordarán temas relacionados con la sostenibilidad, la economía circular y su relevancia en la reducción de plásticos de un solo uso. Además, se profundizará en el estudio de biopolímeros y materiales biodegradables, junto con sus propiedades y aplicaciones en la industria. También, se presentará un análisis del diseño y fabricación de moldes, destacando la importancia de optimizar los procesos para el uso de estos materiales sostenibles. Finalmente, se revisarán las normativas y regulaciones internacionales que rigen el uso de biopolímeros en el etiquetado de productos agrícolas, con especial énfasis en la viabilidad económica y social de su implementación.

2.1. Sostenibilidad y la economía circular

La sostenibilidad se define como la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de que las futuras generaciones puedan satisfacer las suyas. Este concepto se sustenta en tres pilares que conforman un enfoque integral: el pilar ambiental, que se centra en la protección del medio ambiente; el pilar económico, enfocado en fomentar el crecimiento económico mediante el uso eficiente de los recursos; y el pilar social, que promueve la equidad y el bienestar de todas las personas [6]. La combinación de estos tres pilares es esencial para alcanzar un desarrollo sostenible efectivo.

En la actualidad, la sostenibilidad se ha convertido en un imperativo global, dada la creciente preocupación por los efectos adversos del cambio climático, la degradación ambiental y la inequidad social. Además, la sostenibilidad no solo es una responsabilidad ética, sino también una oportunidad para realizar un cambio en la economía y sociedad, mostrando así un modelo más justo y resiliente, capaz de enfrentar los desafíos del futuro con mayor adaptabilidad y sustentabilidad. La importancia de la sostenibilidad, en el contexto actual, radica en su capacidad para abordar problemas complejos y globales como el agotamiento de recursos, la pérdida de biodiversidad y las desigualdades socioeconómicas.

Dentro de este marco, surge el concepto de economía circular, un modelo clave que complementa y refuerza la sostenibilidad. Mientras que la sostenibilidad se enfoca en equilibrar el uso responsable de los recursos, la economía circular propone una solución más práctica: mantener los productos y materiales en uso el mayor tiempo posible mediante la reutilización, reparación y reciclaje [7]. De este modo, el ciclo presente de los productos se consigue alargar, logrando reducir significativamente la generación de residuos y la demanda de recursos naturales, volviéndolo más eficiente y sostenible.

En la **figura 1**, se puede visualizar el modelo de economía circular, el cual ilustra cómo los materiales y productos fluyen dentro de un sistema cerrado, donde el valor se mantiene a lo largo del ciclo de vida, y se minimizan las pérdidas de recursos al medio ambiente.

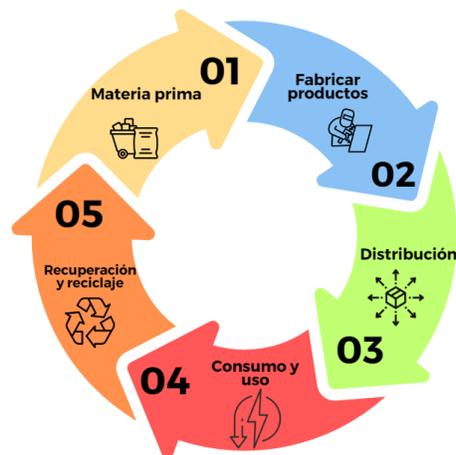


Figura 1. Modelo de economía circular [Elaboración propia].

Este enfoque resulta de gran importancia debido a que en contraste con un modelo económico lineal tradicional, la economía circular logra mantener los recursos en uso durante más tiempo, reduciendo la necesidad de extraer nuevas materias primas y disminuyendo la generación de residuos. Por esa razón, se considera una solución clave para enfrentar los desafíos ambientales actuales, promoviendo un desarrollo más sostenible y eficiente.

En este ámbito, la sostenibilidad y la reducción de plásticos de un solo uso están conectadas, ya que ambas abordan la necesidad de mitigar los impactos ambientales negativos causados por la producción y desecho excesivo de plásticos. Mientras la sostenibilidad impulse un uso más responsable de los recursos, reducir los plásticos de un

solo uso se convierte en un paso esencial para lograrlo. Esto implica fomentar la reutilización de productos y buscar alternativas más sostenibles [8]. Los plásticos de un solo uso, como botellas, vasos, bolsas y envases, representan un alto riesgo para los ecosistemas. Al reducir este tipo de plásticos, se disminuye la contaminación en los océanos, los ríos y otros entornos naturales, lo que contribuye a preservar la biodiversidad y a mantener la salud de los ecosistemas. Además, esta reducción también ayuda a la salud de las personas, al disminuir la exposición a microplásticos y sustancias químicas nocivas que pueden filtrarse al agua y los alimentos, mejorando así la calidad de vida y el bienestar general. A pesar de los beneficios que estos plásticos brindan, se debe considerar que los riesgos asociados a la implementación de estos siguen siendo significativos, lo que subraya la necesidad de buscar estrategias claras y efectivas para reducir su uso.

Considerando los potenciales riesgos que surgen debido a la implementación del plástico de un solo uso, es fundamental buscar estrategias para reducir su uso; si no se logra disminuir de manera significativa, al menos hay que tomar algunas medidas preventivas. Estas medidas incluyen la promoción de la economía circular, que fomenta la reutilización y reciclaje de materiales, así como la inversión en investigación para desarrollar materiales alternativos más sostenibles, como los materiales biodegradables. Estas estrategias están alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular con el ODS 12 que promueve patrones de consumo y producción sostenibles [9]. Además, es crucial implementar políticas y regulaciones que incentiven la reducción del uso de plásticos de un solo uso, educando al público sobre los impactos ambientales y promoviendo cambios en los hábitos de consumo.

2.2. Biopolímeros y materiales biodegradables

La transición hacia el uso de materiales biodegradables es un paso esencial dentro de las estrategias de sostenibilidad mencionadas anteriormente. A medida que se busca reducir la dependencia de los plásticos de un solo uso, los biopolímeros emergen como una solución prometedora debido a su capacidad para descomponerse de manera natural en el medio ambiente. Estos biopolímeros son macromoléculas formadas por la unión de monómeros de origen biológico, provenientes de plantas, microorganismos o incluso animales; también, pueden ser producidos naturalmente o mediante procesos biotecnológicos, lo que destaca su

versatilidad. Su principal característica es la capacidad para biodegradarse, es decir, ser descompuestos por microorganismos en condiciones ambientales adecuadas [10]. Esto contribuye significativamente a disminuir la cantidad de desechos y reducir el impacto ambiental asociado a los plásticos convencionales, alineándose con los principios de sostenibilidad.

Los biopolímeros se clasifican en dos categorías principales: naturales y sintéticos. Los biopolímeros naturales son aquellos que se encuentran en la naturaleza y pueden ser extraídos de plantas, animales o microorganismos. Ejemplos comunes incluyen la celulosa, el almidón, y la quitina [11]. Estos materiales han sido utilizados durante siglos en diversas aplicaciones, y su capacidad para biodegradarse en condiciones naturales los hace ideales para productos que requieren sostenibilidad ambiental.

Por otro lado, los biopolímeros sintéticos son producidos mediante procesos biotecnológicos que involucran la fermentación de azúcares o aceites vegetales por microorganismos. Un ejemplo prominente es el ácido poliláctico (PLA), que se obtiene a partir de la fermentación del almidón de maíz [11]. Comprender la distinción entre biopolímeros naturales y sintéticos es crucial para evaluar sus aplicaciones y propiedades. Mientras que los biopolímeros naturales son típicamente menos procesados y más fácilmente biodegradables, los biopolímeros sintéticos ofrecen mayor versatilidad en términos de propiedades físicas y químicas; sin embargo, ambos tipos de biopolímeros comparten el beneficio de ser alternativas más sostenibles en comparación con otros polímeros, impulsando el avance hacia un futuro más respetuoso con el medio ambiente.

A medida que se profundiza en sus características, los biopolímeros presentan una variedad de propiedades físicas, químicas y mecánicas que los hacen adecuados para distintas aplicaciones. En cuanto a las propiedades físicas, se observa que muchos biopolímeros son similares a los plásticos convencionales, principalmente debido a su capacidad para ser moldeados y su flexibilidad, lo que los hace adecuados para aplicaciones como envases y películas [12]. Químicamente, los biopolímeros son más reactivos y menos estables que los polímeros petroquímicos, lo que facilita su degradación en el medio ambiente, esto se debe a que los enlaces en las cadenas de biopolímeros son más susceptibles a la acción de

microorganismos, agua y otros agentes naturales [13], lo que contribuye a una degradación más rápida y sostenible.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, los biopolímeros pueden ser menos resistentes que los polímeros convencionales, con menores valores de resistencia a la tracción y al impacto [14]. Sin embargo, los avances recientes en la tecnología de materiales están permitiendo la mejora de estas propiedades mediante la mezcla de biopolímeros con otros materiales, como fibras naturales, para aumentar su resistencia y durabilidad. Un ejemplo de esto es el rastrojo de piña, que es una de las variables a tomar en cuenta para este proyecto, con el fin de analizar con cuál biopolímero logra el mejor resultado de compatibilidad; esto amplía el rango de aplicaciones de los biopolímeros, haciéndolos competitivos con los plásticos tradicionales en muchas industrias, desde el empaque de alimentos hasta componentes en la automoción y la construcción.

Más allá de las mejoras mecánicas, los biopolímeros ofrecen varias ventajas en comparación con los plásticos convencionales, destacándose principalmente su origen renovable y su capacidad de biodegradarse. Al estar hechos de recursos biológicos, como el almidón de maíz o la caña de azúcar, contribuyen a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Además, su biodegradabilidad permite que, bajo condiciones adecuadas, se descompongan naturalmente, lo que disminuye significativamente la acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente, ayudando a mitigar la contaminación y protegiendo los ecosistemas [15].

No obstante, a pesar de estas ventajas, los biopolímeros también presentan desventajas frente a los plásticos convencionales; uno de los principales desafíos es su costo de producción, que suele ser más alto debido a la complejidad de los procesos de extracción y fabricación. Además, no todos los biopolímeros son completamente biodegradables en condiciones ambientales típicas, lo que puede limitar sus beneficios ecológicos. Asimismo, en términos de propiedades mecánicas, algunos biopolímeros pueden ser menos resistentes que los plásticos convencionales, lo que restringe su uso en ciertas aplicaciones industriales donde se requieren materiales más robustos [15].

Para abordar estos desafíos en el contexto de este proyecto, se analizarán tres biopolímeros diferentes para evaluar su funcionalidad en relación con los objetivos planteados, estos son el ácido poliláctico (PLA), el copoliéster PBAT y el Ecovio (una mezcla de PLA y PBAT). Cada uno de estos materiales presenta propiedades únicas que pueden influir en el rendimiento final del proyecto y en la eficiencia del proceso de fabricación. Las características más destacadas de cada material se presentan en la **Tabla 1**, donde se ilustran sus propiedades físicas y mecánicas más relevantes para esta aplicación. El objetivo es seleccionar el biopolímero que ofrezca el mejor equilibrio entre biodegradabilidad, propiedades mecánicas y compatibilidad con el proceso de fabricación, maximizando así la sostenibilidad y la eficiencia del diseño. Además, se considerará la interacción con el rastrojo de piña, el cual será evaluado para determinar con cuál de estos biopolímeros logra una mejor compatibilidad, potenciando las propiedades mecánicas y la biodegradabilidad del material compuesto, asegurando un desempeño óptimo en las aplicaciones proyectadas.

Tabla 1. Comparación de propiedades mecánicas y térmicas de los biopolímeros seleccionados (PLA, Ecovio y Ecoflex) [16-19].

| Propiedad | PLA (Ácido Poliláctico) | Ecoflex (C1200) | Ecovio (PLA + PBAT) |
|----------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| Densidad | 1.24 g/cm ³ | 1.25-1.27 g/cm ³ | 1.47 g/cm ³ |
| Temperatura de fusión | 155-170 °C | 110-120 °C | 180-210 °C |
| Elongación de rompimiento | 3.5% | 560-710% | 4.0% |
| Temperatura de deflexión térmica | 55 °C | 91 °C | 93 °C |
| Índice de fluidez | 70 g/10 min | 2.7-4.9 g/10 min | 20 g/10 min |
| Degradabilidad | Biodegradable bajo condiciones de compostaje | Compostable industrial | Compostable y biodegradable |

La importancia de una adecuada selección de biopolímeros y materiales biodegradables radica en su capacidad para ofrecer una alternativa sostenible a los plásticos convencionales, los cuales son difíciles de degradar y suponen una amenaza significativa para los ecosistemas. En un contexto donde la sostenibilidad es cada vez más crucial, los biopolímeros se destacan por su potencial para reducir la acumulación de residuos plásticos, contribuir a la economía

circular y promover un manejo más responsable de los recursos naturales. Este enfoque no solo permite un desarrollo más sostenible, sino que también impulsa la innovación en la industria de materiales, abriendo paso a nuevas aplicaciones más respetuosas con el medio ambiente.

Además, se puede resaltar que los tres biopolímeros brindan excelentes propiedades de compatibilidad en diversas industrias. Sin embargo, el biopolímero que más destaca es el Ecovio debido a que, además de su equilibrio entre propiedades mecánicas y térmicas, es compostable tanto en condiciones industriales como en ambientes naturales, característica que lo convierte en una opción altamente versátil y amigable con el medio ambiente. El Ecovio no solo cumple con estrictas normativas internacionales, como la certificación europea EN 13432 y el estándar ASTM 6400, sino, que también es biodegradable en el suelo, lo que asegura una degradación rápida y eficaz sin dejar residuos dañinos, esto lo convierte en la opción preferida para aplicaciones donde la sostenibilidad y el impacto ambiental son prioritarios. Certificaciones adicionales, como la CIC italiana, la GreenPla japonesa y el estándar canadiense CAN/BNQ 0017-088, refuerzan su compatibilidad con regulaciones internacionales en una amplia variedad de mercados, lo que asegura su aceptación global en industrias que buscan opciones compostables [20].

En línea con esta innovación, las tendencias actuales en el etiquetado sostenible de productos agrícolas están marcadas por la creciente demanda de soluciones ecológicas, que reduzcan el impacto ambiental a lo largo de toda la cadena de suministro. Entre las innovaciones más destacadas se encuentran las etiquetas biodegradables y compostables, elaboradas a partir de biopolímeros como PLA y PBAT, estas etiquetas no solo cumplen su función informativa, sino que también se descomponen en condiciones naturales sin dejar residuos tóxicos, lo que promueve prácticas agrícolas más sostenibles. La adopción de este tipo de etiquetado es clave para empresas que buscan alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en la reducción de desechos plásticos [21].

2.3. Diseño y fabricación de moldes

A medida que se buscan alternativas sostenibles como los biopolímeros, el diseño de moldes debe adaptarse para manejar las particularidades de estos nuevos materiales. La

evolución en el diseño de moldes es esencial para maximizar las ventajas de los biopolímeros y minimizar sus limitaciones en aplicaciones industriales, asegurando que su uso sea efectivo, tanto en términos de producción como de sostenibilidad.

Por esa razón, el diseño de moldes es fundamental en la fabricación de productos, ya que influye directamente en la eficiencia del proceso y la calidad del producto. Un buen diseño de molde debe considerar aspectos como la geometría del producto, las propiedades del material, y las condiciones de operación como la temperatura y presión. Estos factores son vitales para garantizar que el molde funcione correctamente durante la producción y que el producto cumpla con las especificaciones requeridas.

En este proyecto, se contempla el diseño de un molde específicamente para la producción de un conjunto de plastiflechas. Este enfoque tiene en cuenta aspectos críticos para asegurar un resultado óptimo en la fabricación y desempeño del producto. Un diseño eficiente del molde también ayuda a minimizar los defectos y el desperdicio, asegurando así el éxito de la producción, además esto garantiza que se cumplan los objetivos de sostenibilidad y calidad establecidos [22].

Las plastiflechas se consideran un dispositivo pequeño y funcional, diseñado para el etiquetado de frutas, permitiendo la fijación de etiquetas de manera segura y eficiente sin causar daño al producto. Un ejemplo de estas plastiflechas se visualiza en la **figura 2**. Además, cabe mencionar que estas están diseñadas para insertarse fácilmente en la fruta a través de máquinas estandarizadas, asegurando que la etiqueta permanezca adherida durante el manejo y transporte. Con la creciente preocupación por el medio ambiente, se están desarrollando plastiflechas biodegradables para reducir el impacto ambiental generado por los residuos plásticos convencionales [21].

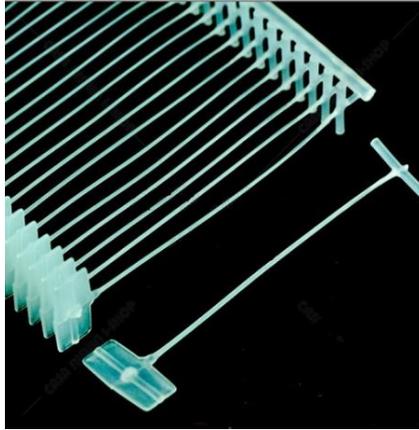


Figura 2. Conjunto de plastiflechas [23].

Del mismo modo, durante el diseño de los moldes se debe tener en cuenta la durabilidad y la facilidad de mantenimiento del molde, aspectos que son cruciales para reducir tiempos de ciclo y costos operativos. La integración de tecnologías avanzadas en el diseño, como el uso de software CAD, permite mejorar la precisión y eficiencia del diseño, lo que resulta en un proceso de fabricación más eficiente y rentable [24].

Las herramientas por Diseño Asistido por Computadora (CAD) se emplean para crear, analizar o cambiar diseños y modelos bidimensionales o tridimensionales más precisos y detallados en un entorno digital, en lugar de utilizar métodos de dibujo manuales [25]. En este proyecto, se emplea SolidWorks como la herramienta principal de diseño asistido por computadora para desarrollar el molde. Gracias a este software, los diseñadores pueden visualizar y modificar el molde antes de la fabricación, lo que reduce el riesgo de errores costosos y mejora la calidad del diseño. Este tipo de herramientas permiten, de igual modo, simular cómo se comportará el material dentro del molde, lo que es fundamental para garantizar que el molde funcione correctamente bajo las condiciones de producción previstas [26].

Es así, que aprovechando esta base la impresión 3D será empleada en este proyecto para la creación del prototipo inicial del molde. Esta técnica permite una mayor flexibilidad en la etapa de diseño, ofreciendo una solución más rápida y económica para la fabricación del prototipo final en materiales más resistentes, como el acero o aluminio, que son los más

utilizados en la industria, debido a que logran soportar las altas presiones y temperaturas del proceso de inyección.

Complementando este enfoque, se utilizará Moldex3D para realizar simulaciones del proceso de inyección, lo que permitirá identificar posibles problemas relacionados con el flujo del material, el enfriamiento y la degradación del biopolímero, optimizando la eficiencia y calidad del diseño antes de la producción en masa. El enfoque que lleva este proyecto combina el uso de CAD, impresión 3D y simulaciones avanzadas, lo cual permite anticipar inconvenientes y mejorar la precisión del diseño, garantizando una toma de decisiones informada a lo largo del desarrollo del proyecto.

Dado que este proyecto tiene un enfoque sostenible, se utilizarán biopolímeros como el ácido poliláctico (PLA) y otros materiales biodegradables similares, debido a su bajo impacto ambiental y capacidad de descomposición en condiciones controladas. Estos exigen un control preciso de la temperatura durante el moldeo por inyección para evitar la degradación del material, que podría comprometer tanto la calidad mecánica como el acabado final del producto. El uso de estos biopolímeros es clave para el enfoque sostenible del proyecto, ya que ofrecen una alternativa a los plásticos convencionales.

Para lograr este control, es crucial ajustar adecuadamente los parámetros de procesamiento, como la temperatura y la presión de inyección, y el tiempo de enfriamiento a las características particulares de los biopolímeros. Estos factores no solo ayudan a mantener la integridad del material durante el proceso de inyección, sino que también evitan defectos comunes como burbujas o vacíos en las plastiflechas biodegradables. Además, una correcta optimización del ciclo de producción permite reducir los tiempos, lo que no solo disminuye los costos operativos, sino que también mejora la durabilidad del molde y favorece la sostenibilidad del proceso, minimizando el desperdicio de material y el consumo energético. Con base en esto, a continuación, se describirán las principales técnicas de moldeo utilizadas en la industria para llevar a cabo este proceso de manera eficiente y controlada.

2.4. Procesos de moldeo

Los procesos de moldeo son técnicas fundamentales en la industria de manufactura. Son técnicas diseñadas para transformar materiales plásticos y otros compuestos en productos mediante la utilización de moldes específicos, estas permiten la creación de piezas con geometrías complejas y un alto grado de repetibilidad, lo que es crucial para la producción en masa [27]. Existen diversas técnicas de moldeo, como el moldeo por inyección, compresión, extrusión y soplado, cada una adaptada a las características del material y a los requerimientos del producto. La elección del proceso adecuado depende de varios factores, como el tipo de material, el volumen de producción y la precisión requerida, asegurando así que el proceso sea eficiente en términos de costos y calidad.

Cada técnica de moldeo tiene sus ventajas y limitaciones. El moldeo por inyección, por ejemplo, se destaca por su capacidad para producir piezas con alta precisión y consistencia, siendo ampliamente utilizado en la producción de componentes plásticos [28]. Por otro lado, el moldeo por compresión es más adecuado para la producción de piezas más grandes o hechas de materiales como el caucho, aplicando presión sobre el material dentro de un molde caliente [29]. Asimismo, técnicas como el moldeo por soplado se utilizan principalmente para la producción de productos huecos, como botellas; mientras que el moldeo por extrusión es común en la fabricación de perfiles continuos, como tuberías. Cada técnica tiene sus propios requerimientos y se selecciona según las necesidades del proyecto, garantizando que el método elegido sea el más adecuado para la aplicación.

El costo asociado a las técnicas de moldeo varía considerablemente según el método utilizado, considerando el tipo de material y la complejidad del diseño. El moldeo por inyección, aunque es altamente eficiente para la producción en masa, implica un costo inicial elevado debido al diseño y fabricación del molde, que puede alcanzar los miles de dólares dependiendo de su complejidad [28]. Por otro lado, técnicas como el moldeo por compresión o soplado suelen tener costos de inversión más bajos, pero pueden ser menos eficientes para la producción de piezas en grandes volúmenes [30].

A medida que se exploran los distintos procesos de moldeo, es importante resaltar cómo cada uno se adapta a diferentes tipos de materiales y aplicaciones. En la siguiente sección, se

abordará a detalle la técnica que seleccionó para este proyecto, explicando su funcionamiento, sus ventajas para la producción en masa y cómo su aplicación en este proyecto resulta fundamental para alcanzar la precisión y calidad necesarias en la fabricación de plastiflechas biodegradables. Además, se verá cómo las herramientas de simulación, como Moldex3D, juegan un papel clave en la optimización de este proceso, asegurando una mayor eficiencia y sostenibilidad.

2.4.1. Técnica de moldeo por inyección

El moldeo por inyección es una técnica ampliamente utilizada en la fabricación de moldes, particularmente en la producción de piezas de plástico. Este proceso implica inyectar material fundido en un molde, donde se enfría y solidifica para tomar la forma deseada. El moldeo por inyección es ideal para la producción en masa debido a su alta precisión y repetibilidad, lo que lo hace adecuado para fabricar piezas con geometrías complejas [31]. El proceso se divide en varias etapas clave: alimentación, donde el material plástico en forma de gránulos es introducido en la máquina; inyección, en la que el plástico fundido es forzado dentro del molde; mantenimiento, que asegura que el material se distribuya uniformemente dentro del molde; enfriamiento, donde el plástico se solidifica; y, finalmente, expulsión, en la que el molde se abre y la pieza se retira, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

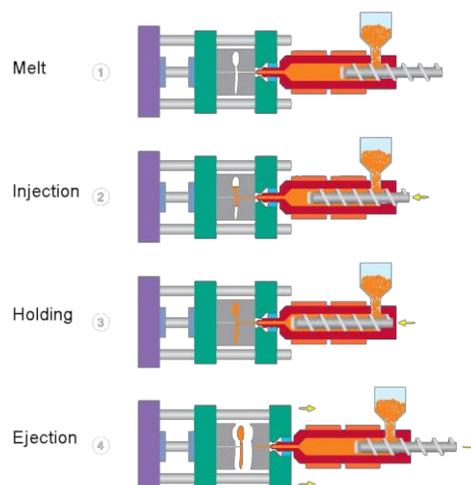


Figura 3. Diagrama de moldeo por inyección [32].

Además de su versatilidad, el moldeo por inyección es un proceso altamente adaptable que se puede aplicar a una amplia variedad de materiales, desde plásticos convencionales como polietileno y polipropileno hasta biopolímeros, como el ácido poliláctico (PLA) y otros materiales biodegradables. Una de sus principales ventajas es su alta precisión y repetibilidad, lo que permite fabricar piezas con tolerancias estrictas de manera consistente. Asimismo, es ideal para la producción en masa, ya que, una vez fabricado el molde inicial, las piezas se pueden producir en grandes volúmenes a bajo costo. Este proceso también genera un bajo desperdicio de material, dado que la mayoría del material se utiliza para la pieza final, lo que lo convierte en un proceso más sostenible en comparación con otras técnicas de manufactura; esto lo hace particularmente beneficioso para aplicaciones en industrias como la producción de biopolímeros biodegradables.

Asimismo, cabe destacar que para el moldeo por inyección existen diversas técnicas, una de ellas es el moldeo de inyección con prensa, esta técnica se considera una de las opciones más sencillas y efectivas, lo que la hace ideal para implementar en varias aplicaciones industriales. Debido al propósito de este proyecto, es fundamental contar con una herramienta que sea fácil de utilizar, versátil y portátil. El moldeo por inyección con prensa cumple con estos requisitos, ya que permite realizar ajustes rápidos y precisos en los parámetros de inyección, lo cual facilita la producción eficiente de piezas con diferentes tamaños y geometrías [33]. Además, la característica de portabilidad hace que sea una excelente opción para pequeñas plantas o entornos donde el espacio es limitado, garantizando al mismo tiempo la calidad y repetibilidad en la producción. Un claro ejemplo de este tipo de equipo se muestra en la **figura 4**.



Figura 4. Modelo de moldeo por inyección neumático de escritorio [34].

A pesar de las ventajas de este proceso, hay que tener en cuenta que cada vez que se lleva a cabo un determinado proceso surgen ciertos desafíos. El caso del moldeo de materiales biodegradables no es la excepción, ya que este procedimiento presenta algunos retos que no se encuentran en los plásticos convencionales, principalmente debido a las propiedades únicas de estos materiales. Uno de los principales retos es la sensibilidad térmica de estos materiales, ya que muchos biopolímeros tienen una ventana de procesamiento térmico más estrecha [35]. Esto significa que la temperatura de moldeo debe ser controlada con precisión para evitar la degradación del material durante el proceso, lo cual puede comprometer las propiedades mecánicas y la calidad del producto final. Además, la reología de los biopolímeros puede diferir significativamente de los plásticos tradicionales, lo que complica el llenado del molde y puede resultar en defectos como burbujas o vacíos dentro de la pieza moldeada [35].

A causa de la necesidad de garantizar una distribución uniforme del material y evitar defectos en el producto terminado, se utiliza la herramienta Moldex3D para simular y optimizar el proceso de inyección de plástico en el molde. Este fue el proceso de moldeo seleccionado debido a su capacidad para producir piezas con alta precisión y repetibilidad, especialmente en aplicaciones donde se requiere una gran calidad y consistencia. Moldex3D permite analizar el flujo del material, la transferencia de calor y otros factores críticos durante la inyección, lo que ayuda a identificar posibles problemas y mejorar el diseño del molde

antes de la fabricación [36]. Esto garantiza una mayor eficiencia en la producción y una mejor calidad del producto.

Del mismo modo, cabe destacar que el moldeo por inyección es una técnica ampliamente utilizada para la fabricación de productos plásticos. Entre los productos más comunes fabricados mediante esta técnica se encuentran las piezas automotrices, los dispositivos médicos, los envases de plástico, los componentes electrónicos, y más recientemente, los productos sostenibles como utensilios biodegradables y envases de biopolímeros [37]. Para este proyecto, el moldeo por inyección es un pilar en la producción de plastiflechas biodegradables, ya que este proceso, como se mencionó anteriormente, ofrece una alta precisión y consistencia, lo cual es crucial debido a las dimensiones y la forma específica de las plastiflechas.

En términos de sostenibilidad, el moldeo por inyección de biopolímeros desempeña un rol fundamental en la reducción de residuos plásticos. A diferencia de los plásticos convencionales, los biopolímeros utilizados en este proceso son biodegradables, lo que contribuye a disminuir la contaminación por plásticos y favorece la transición hacia una economía circular [38]. Este proceso permite optimizar el uso de materiales reciclables y biocompatibles, minimizando el desperdicio durante la producción y asegurando que los productos terminados sean más respetuosos con el medio ambiente. Este enfoque no solo reduce el impacto ambiental, sino que también responde a la creciente demanda de soluciones sostenibles en la industria manufacturera.

2.5. Normativas y regulaciones internacionales sobre materiales biodegradables

Existen aspectos adicionales a considerar, como las certificaciones y normativas específicas para productos biodegradables en los mercados internacionales. Pues, cumplir con estas regulaciones es esencial para asegurar que los productos no solo sean aceptables en términos de calidad, sino también respetuosos con el medio ambiente durante su ciclo de vida. Estas normativas abarcan desde el proceso de fabricación hasta el etiquetado y

disposición final del producto, y se enfocan en garantizar que los productos sean seguros, sostenibles y competitivos en mercados globales.

En Europa, las normativas ambientales son especialmente rigurosas y están diseñadas para minimizar el impacto ambiental de los productos durante su uso. La Directiva 94/62/CE sobre envases y residuos de envases es una de las regulaciones clave que establece requisitos para la reducción del uso de materiales peligrosos y promueve el reciclaje y la reutilización [39]. Además, el Reglamento REACH (Reglamento (CE) N.º 1907/2006) exige la evaluación de riesgos de las sustancias químicas utilizadas en productos, garantizando que no presenten riesgos inaceptables para la salud humana y el medio ambiente [40]. Estas normativas reflejan el compromiso de la UE con la sostenibilidad y la protección ambiental.

Fuera de Europa, mercados relevantes como Japón y Estados Unidos, también imponen estrictas regulaciones ambientales. En Japón, la Ley de Reciclaje de Contenedores y Embalajes requiere que los fabricantes reduzcan los residuos de envases y promuevan el reciclaje [41]. En Estados Unidos, la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA) regula la producción y uso de productos químicos [42]. Cumplir con estas normativas es crucial para la exportación de productos biodegradables, ya que garantiza que los productos sean aceptables en diferentes mercados.

Para la exportación de productos biodegradables, los requisitos específicos varían según el país de destino, pero todos comparten un enfoque en la seguridad, el impacto ambiental y la información clara al consumidor. En la Unión Europea, los productos deben cumplir con la Directiva 2008/98/CE sobre residuos, que establece que los productos biodegradables deben descomponerse de manera segura en el entorno sin causar daño al medio ambiente [43]. Además, deben cumplir con la norma EN 13432, que define los requisitos para envases recuperables mediante compostaje y biodegradación [44]. Cumplir con estas exigencias demuestra un compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental, lo que es crucial para ganar la confianza de los consumidores y reguladores en los mercados internacionales.

Este compromiso con la sostenibilidad y la calidad se refuerza a través de las certificaciones y estándares internacionales, que se aseguran de que los productos

biodegradables cumplan con los requisitos establecidos. La norma EN 13432 es un estándar europeo que define los requisitos para la compostabilidad de los envases, asegurándose de que estos se descompongan completamente en un entorno de compostaje industrial [44]. Esta certificación es ampliamente reconocida en Europa y es un requisito previo para que los productos sean etiquetados como compostables en el mercado europeo. Asimismo, existe la norma ASTM D6400 en Estados Unidos, que establece los criterios para la compostabilidad de los plásticos en instalaciones de compostaje [45].

Además, certificaciones como la del “Biodegradable Products Institute” (BPI) son esenciales en mercados como Estados Unidos, esta certificación es una de las más reconocidas para productos compostables, verificando que los productos se descompongan en condiciones específicas sin dejar residuos tóxicos [46]. Estas certificaciones no solo aseguran la calidad del producto, sino que también facilitan su aceptación en los mercados internacionales, proporcionando a los consumidores la confianza de que están comprando productos verdaderamente sostenibles.

2.6. Implicaciones económicas y sociales

Las certificaciones mencionadas refuerzan la confianza del consumidor en la autenticidad y efectividad de estos productos. Este compromiso con la calidad es crucial, ya que el impacto económico de la producción y comercialización de productos biodegradables depende en gran medida de la percepción del mercado sobre su sostenibilidad y cumplimiento regulatorio. La producción y comercialización de productos biodegradables tiene un impacto económico significativo, especialmente en el contexto de la creciente demanda global de soluciones sostenibles. A medida que las regulaciones ambientales se vuelven más estrictas y los consumidores se vuelven más conscientes de los problemas ecológicos, la industria de los productos biodegradables experimenta un crecimiento acelerado.

Según un estudio publicado en el EFB Bioeconomy Journal, el mercado de bioplásticos biodegradables muestra un potencial de crecimiento significativo, aunque este depende de factores económicos y políticos clave. Las proyecciones indican que bajo escenarios favorables la capacidad de producción global podría aumentar en un 4.98% anual hasta el 2030, lo que sugiere un futuro prometedor para esta industria [47].

Sin embargo, este crecimiento también implica desafíos económicos, como el mayor costo de producción de los biopolímeros en comparación con los plásticos convencionales. Las empresas deben equilibrar la inversión en nuevas tecnologías y materiales con la necesidad de mantener precios competitivos. A pesar de estos desafíos, la tendencia hacia la sostenibilidad y la economía circular está creando un entorno económico favorable para los productos biodegradables, impulsando tanto la innovación como la inversión en este sector [48].

La producción de productos biodegradables puede empoderar a las comunidades locales al involucrarlas en procesos productivos que promueven la sostenibilidad, esto no solo mejora la calidad de vida de los trabajadores, sino que también fortalece las economías locales al diversificar las fuentes de ingresos y reducir la dependencia de otras industrias. Las iniciativas que integran a las comunidades locales en la cadena de suministro de productos biodegradables también promueven la inclusión social y económica, permitiendo a las comunidades participar activamente en la economía verde y beneficiarse directamente de la transición hacia un modelo más sostenible [49]. Esto es especialmente notable porque permite a las comunidades locales ser protagonistas en la transición hacia un futuro más verde y resiliente. Al participar en la producción de productos biodegradables, estas comunidades no solo aseguran su desarrollo económico, sino que también contribuyen activamente a la lucha contra el cambio climático y la degradación ambiental.

En el capítulo 2, se realizó una revisión bibliográfica de conceptos fundamentales para comprender de manera concisa este trabajo. Donde, la economía circular y la sostenibilidad fueron aspectos clave que destacan por su relevancia en la reducción de plásticos de un solo uso y en la promoción de prácticas más sostenibles en la industria, estos conceptos proporcionaron una base teórica sólida para el desarrollo del proyecto. En el siguiente capítulo se ilustrará la metodología empleada para elaborar exitosamente este proyecto de graduación.

Capítulo 3

Metodología del proyecto

3.1. Análisis de materiales y especificaciones del molde

3.1.1. Identificación de las características del material biodegradable

El primer paso en el desarrollo de las plastiflechas biodegradables consiste en investigar los materiales biodegradables disponibles en el mercado, como el ácido poliláctico (PLA), el tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT) y sus combinaciones. Esta investigación debe enfocarse en obtener información relevante sobre las propiedades mecánicas del material, como su resistencia, dureza y flexibilidad, así como su capacidad de biodegradación bajo condiciones específicas. Además, es esencial analizar la compatibilidad de estos materiales con procesos de inyección o compresión, teniendo en cuenta la temperatura de procesamiento y los tiempos de ciclo requeridos para garantizar un flujo eficiente durante la producción.

Una vez seleccionados los biopolímeros potenciales, se deben revisar las fichas técnicas para identificar aquellos materiales que cumplan con los requisitos del proyecto, como la sostenibilidad, la disponibilidad y las propiedades físicas adecuadas para la fabricación de plastiflechas. Posteriormente, se debe realizar un análisis de las propiedades de flujo (reología) del material para asegurar que durante el proceso de inyección el biopolímero pueda llenar el molde completamente sin generar defectos, como vacíos o rebabas.

3.1.2. Revisión de normativas aplicables

El siguiente paso en el proceso consiste en investigar las normativas tanto internacionales como nacionales, que regulan la fabricación de productos biodegradables para el etiquetado agrícola. Este análisis debe centrarse en identificar las regulaciones relacionadas con el contacto con alimentos. Además, es fundamental revisar las normativas medioambientales aplicables a la compostabilidad y biodegradabilidad del material, como

las normas EN 13432 y ASTM D6400, las cuales establecen los criterios para certificar productos como biodegradables y compostables.

Asimismo, se debe verificar el cumplimiento de las certificaciones y requisitos necesarios para la exportación de las plastiflechas a mercados clave como la Unión Europea y Estados Unidos. Esto incluye la revisión de los estándares de calidad que deben cumplir los productos agrícolas exportables. Documentar estos requisitos regulatorios es esencial para asegurar que tanto el diseño del molde como los materiales seleccionados cumplan con todas las regulaciones pertinentes y sean aceptados en los mercados internacionales.

3.1.3. Definición de parámetros de procesamiento

Una vez definido el material biodegradable a utilizar, es necesario identificar los parámetros críticos que influyen en el proceso de inyección o compresión para asegurar la calidad y eficiencia del producto. Entre los parámetros más relevantes se encuentran la temperatura de fusión y enfriamiento, la presión de inyección y la velocidad del proceso. Además, es crucial determinar los tiempos de ciclo, considerando las etapas de llenado, mantenimiento de presión y enfriamiento, para optimizar la producción y evitar defectos en las piezas moldeadas.

3.1.4. Establecimiento de condiciones de enfriamiento y desmoldeo

El diseño del sistema de enfriamiento en el molde es un factor determinante para obtener piezas de calidad y minimizar los tiempos de ciclo. En este proyecto, se utilizaron simulaciones con el software Moldex3D para definir el sistema de canales de enfriamiento, asegurando una distribución uniforme de la temperatura. En cuanto al desmoldeo, se determinaron las mejores condiciones para asegurar una extracción suave de las piezas sin generar daños, esto incluye establecer ángulos de salida adecuados, evaluar la necesidad de utilizar agentes desmoldeantes biodegradables, y ajustar la velocidad y fuerza de desmoldeo para evitar deformaciones.

3.2. Diseño del molde mediante simulaciones computacionales

3.2.1. Recopilación de información sobre dimensiones y configuraciones del molde

El primer paso para diseñar un molde eficiente para la fabricación de plastiflechas biodegradables consiste en realizar un análisis detallado de las necesidades específicas en relación con el etiquetado de frutas. Es fundamental identificar el tamaño, la forma y las características que deben tener las plastiflechas para adaptarse correctamente a los sistemas de etiquetado en la industria agrícola. Una vez definido el concepto básico, es importante de igual modo, consultar al LANOTEC con el fin de obtener información precisa sobre las dimensiones exactas y cualquier otro requisito adicional que pueda surgir. Adicionalmente, es importante investigar los sistemas de etiquetado empleados en la exportación de frutas para garantizar que las plastiflechas sean compatibles con los procesos automatizados.

3.2.2. Diseño de la geometría y dimensiones del molde en CAD

Una vez recopilada la información necesaria, el siguiente paso es utilizar el software SolidWorks, para desarrollar la geometría del molde; el proceso comienza con la creación de un modelo tridimensional detallado de la plastiflecha, tomando en cuenta las dimensiones y características obtenidas en la etapa anterior. Este modelo 3D no solo refleja la forma final del producto, sino que también permite evaluar aspectos como la distribución del material y los puntos críticos en la estructura de la pieza.

A partir de este modelo, se procede a diseñar el molde, prestando especial atención a la ubicación de los puntos de inyección y la disposición de las cavidades. El objetivo es asegurar que la geometría del molde permita un llenado uniforme durante el proceso de inyección y un desmoldeo sin problemas, minimizando defectos y optimizando la producción.

3.2.3. Simulaciones computacionales para optimizar el proceso de llenado

Con el diseño inicial del molde desarrollado, es momento de utilizar software especializado en simulación, Moldex3D, para analizar el proceso de llenado. Estas simulaciones permiten configurar parámetros como el tipo de material, la temperatura, la

presión y la velocidad de inyección para predecir cómo se comportará el material dentro del molde durante la producción. Es fundamental evaluar el flujo del material en todas las etapas del proceso, identificando posibles defectos como atrapamiento de aire o zonas con enfriamiento desigual, que podrían comprometer la calidad de las plastiflechas fabricadas. A medida que se obtienen los resultados de la simulación, se realizan ajustes en el diseño del molde y su configuración para mejorar el rendimiento.

3.3. Prototipado del molde

3.3.1. Determinación del proceso de fabricación más eficiente para el molde

El primer paso para asegurar un diseño efectivo del molde consiste en evaluar las diferentes tecnologías de fabricación disponibles, como el moldeo por inyección o la compresión, para identificar cuál se adapta mejor a los biopolímeros seleccionados y a los requisitos específicos del proyecto. Este análisis comparativo debe considerar factores clave como el tiempo de ciclo, la calidad de las piezas producidas, la complejidad del diseño del molde y la viabilidad económica del proceso.

3.3.2. Selección de materiales adecuados para la fabricación del molde

Una vez definida la tecnología de fabricación, el siguiente paso es analizar los materiales disponibles para la construcción del molde. Es fundamental considerar factores como la resistencia al desgaste, la durabilidad, la compatibilidad con los biopolímeros y la eficiencia térmica. Materiales como el acero inoxidable, el aluminio y ciertas aleaciones especializadas son opciones comunes debido a su alta conductividad térmica y resistencia, lo que permite soportar los ciclos repetidos de producción sin comprometer la calidad de las piezas.

Además, se debe evaluar cómo estos materiales interactúan con los biopolímeros seleccionados durante el proceso de inyección o compresión. Esto incluye considerar si el material del molde afecta la facilidad de desmoldeo o si existe el riesgo de reacciones químicas que puedan comprometer la calidad del producto terminado. Finalmente, se debe verificar la disponibilidad y el costo de estos materiales para asegurar que el proceso sea viable desde una perspectiva económica.

3.3.3. Fabricación del prototipo del molde utilizando técnicas como impresión 3D

Con el diseño y los materiales seleccionados, se procede a la fabricación del prototipo del molde utilizando técnicas rápidas como la impresión 3D. Esta tecnología ofrece la ventaja de validar el diseño a un costo reducido, permitiendo realizar ajustes y optimizaciones antes de invertir en la fabricación de un molde definitivo. La impresión 3D proporciona flexibilidad en la etapa inicial, permitiendo evaluar la geometría y funcionalidad del molde con precisión.

3.3.4. Ensamble del prototipo del molde

El ensamblaje del prototipo del molde es una etapa crucial para validar el diseño. Durante este proceso, se debe verificar que todas las partes encajen correctamente. Esta revisión inicial permite identificar y corregir posibles problemas de alineación o ajustes que podrían afectar el rendimiento del molde.

3.4. Evaluación de la viabilidad económica y escalamiento

3.4.1. Realización de un análisis detallado de los costos asociados a la fabricación del molde y del producto final

El primer paso en la evaluación económica del proyecto es identificar y desglosar todos los costos asociados a la fabricación del molde; los cuales incluyen los costos de materiales. Es fundamental diferenciar entre costos fijos y variables en el análisis; los costos fijos suelen incluir el diseño y desarrollo del molde, mientras que los costos variables están vinculados a la producción en sí, como el consumo de energía, la adquisición de materias primas biodegradables y los costos de operación asociados a cada ciclo de producción. Realizar un desglose detallado de estos costos permite obtener una visión completa del impacto económico y facilita la planificación financiera a largo plazo.

El capítulo 3 se centró en describir y detallar la metodología empleada para cumplir con los objetivos planteados en el primer capítulo. Se tomaron en cuenta los pasos necesarios para el análisis de materiales, diseño del molde, simulaciones computacionales y prototipado. En el siguiente capítulo se abordarán los resultados del proyecto, con el fin de evaluar la efectividad de la metodología aplicada.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En la siguiente sección se realizará un análisis detallado de los resultados. Este análisis abarcará los principales aspectos abordados en el proyecto, como el establecimiento de los parámetros de diseño, la implementación de simulaciones computacionales, la fabricación de un prototipo de molde y la evaluación de los costos asociados. Cada uno de estos elementos será evaluado con el fin de garantizar que el proceso de diseño del molde para plastiflechas biodegradables cumpla con los objetivos de sostenibilidad, eficiencia y calidad establecidos en las etapas iniciales del proyecto.

4.1. Criterio de selección de polímeros

En esta sección se analizarán tres diferentes biopolímeros, para determinar su compatibilidad con el rastrojo de piña. Los polímeros seleccionados son Ácido Poliláctico (PLA), Ecoflex® F Blend C1200, y Ecovio® IS1335 (una mezcla de PBAT y PLA), se evaluarán sus propiedades físicas, térmicas y de biodegradabilidad, con el fin de identificar cuál de ellos ofrece el mejor rendimiento en el proceso de moldeo por inyección, y maximiza la sostenibilidad del proyecto.

4.1.1. Evaluación de propiedades

En la evaluación de los polímeros seleccionados, se considerarán diversas propiedades clave que influirán en su rendimiento durante el proceso de moldeo por inyección y su compatibilidad con el rastrojo de piña. Estas propiedades determinarán no solo su capacidad para soportar las condiciones del proceso de fabricación, sino también su contribución a los objetivos de sostenibilidad del proyecto. A lo largo de esta sección, se examinará cada biopolímero con el fin de identificar cuál de ellos proporciona el equilibrio óptimo entre rendimiento y respeto por el medio ambiente.

Primeramente, se presentará el Ácido Poliláctico (PLA) este es conocido por su alta capacidad de moldeabilidad, que lo hace ideal para procesos de moldeo por inyección, garantizando que se puedan fabricar productos de manera eficiente y a gran escala, como las plastiflechas biodegradables que se desarrollan en este proyecto. Además, posee un conjunto de propiedades físicas y térmicas que lo hacen adecuado para ciertas aplicaciones en la industria.

Desde un punto de vista térmico, el PLA tiene una temperatura de fusión entre 160 y 170 °C y una temperatura de transición vítrea entre 55 y 65 °C, estas propiedades hacen que este tipo de material sea óptimo para procesos como el moldeo por inyección, esto se debe a que este es un método que requiere un control muy minucioso de la temperatura, con el fin de evitar deformaciones en el proceso y que el acabado final del producto sea uniforme y de alta calidad.

Mecánicamente, el PLA ofrece una resistencia a la tracción de hasta 48 MPa y una resistencia a la flexión de hasta 83 MPa, lo que garantiza que las piezas fabricadas mantendrán una buena integridad estructural [16]. Estas características, junto con su baja deformabilidad, lo hacen una opción viable dentro de las alternativas consideradas para este proyecto.

A continuación, se abordará el segundo polímero seleccionado, el Ecoflex® F Blend C1200, este es desarrollado por BASF. Este polímero se seleccionó para este proyecto debido a sus propiedades de compostabilidad y biodegradación. Del mismo modo, al cumplir con estrictas normativas internacionales como la EN 13432 y ASTM D6400, este biopolímero es una opción confiable para garantizar que los productos no solo sean efectivos en su función, sino también respetuosos con el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida [50]. Este presenta propiedades que lo hacen adecuado para el moldeo por inyección y para la producción de películas biodegradables.

Su punto de fusión se sitúa entre 110 y 120 °C, lo que permite su procesamiento a temperaturas moderadas [18]. Este material tiene una excelente elongación a la rotura, con valores que alcanzan el 710% en la dirección transversal y el 560% en la dirección longitudinal, lo que proporciona una notable flexibilidad y resistencia a las tensiones mecánicas [50]. Estas propiedades lo convierten en un material altamente adaptable para la

fabricación de productos que requieren alta durabilidad y flexibilidad, asegurando que el producto soporte las demandas de su uso en condiciones industriales y agrícolas.

El último polímero por analizar es el Ecovio®, un biopolímero compostable desarrollado por BASF, diseñado específicamente para aplicaciones de moldeo por inyección. Su importancia en este proyecto radica en su capacidad para combinar las ventajas de la biodegradabilidad con un alto rendimiento mecánico y térmico. Este material está compuesto por una mezcla de PLA y Ecoflex®, lo que les otorga una resistencia superior frente a otros biopolímeros simples y, al mismo tiempo, lo hace completamente compostable en entornos industriales.

El Ecovio® destaca por su equilibrio entre rigidez y resistencia, lo que le permite ser comparable con plásticos tradicionales como el polipropileno y el poliestireno de alto impacto. Presenta una temperatura de deflexión térmica de 55 °C, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren estabilidad dimensional a temperaturas moderadas [17]. Mecánicamente, este polímero ofrece una buena resistencia al impacto, con propiedades que permiten su uso en aplicaciones donde se espera una exposición a condiciones de estrés mecánico.

4.1.2. Compatibilidad de polímeros

En esta sección, se analizará la compatibilidad de los biopolímeros seleccionados. Como punto de partida, se realizó un FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), debido a que este método ayuda a evaluar aspectos claves que pueden influir en el proyecto, de este modo se aprecia de una forma más ilustrativa cuales son las ventajas de utilizar biopolímeros en combinación con un material natural como lo es el rastrojo de piña, así como los desafíos que deben de superarse para garantizar la viabilidad del proyecto. En este contexto, el rastrojo de piña se presenta como un material clave debido a su composición y propiedades. Seguidamente, en la **figura 5**, se destacan los aspectos más relevantes para el análisis de compatibilidad de los biopolímeros.

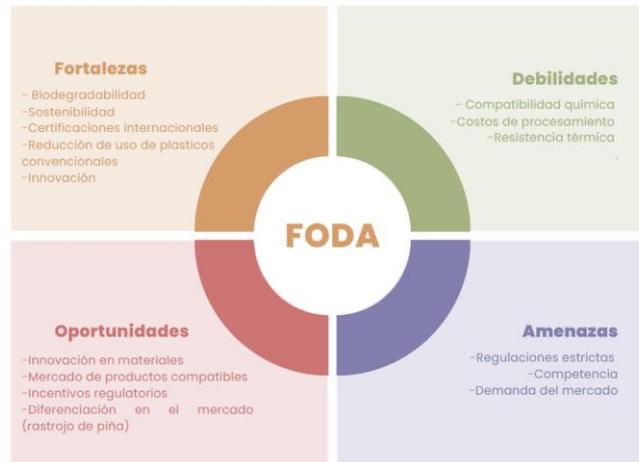


Figura 5. Análisis FODA de los aspectos más relevantes para el análisis de compatibilidad de los biopolímeros [Elaboración propia].

En complemento a lo anterior, es importante conocer de igual modo algunas características del rastrojo de piña, que está compuesto principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, es un subproducto agrícola que presenta propiedades prometedoras para su uso en materiales compuestos. Su contenido en fibra natural le otorga una excelente capacidad de refuerzo, mejorando las propiedades mecánicas cuando se combina con biopolímeros. Además, al ser un material biodegradable, es altamente compatible con polímeros como el PLA, Ecoflex® y Ecovio®, promoviendo una mayor sostenibilidad en la producción de instrumentos plásticos biodegradables. Sin embargo, su alta absorción de agua y la variabilidad en la estructura química pueden presentar desafíos en el procesamiento [51], requiriendo ajustes en el moldeo por inyección o el uso de tratamientos previos para mejorar la compatibilidad.

Asimismo, estas fibras poseen una alta resistencia a la tracción, lo que las convierte en un excelente material de refuerzo para biopolímeros, mejorando la rigidez y estabilidad dimensional del producto final [52]. Además, el bajo costo y la disponibilidad abundante del rastrojo de piña hacen que sea un material atractivo para aplicaciones sostenibles en la industria de polímeros compuestos [52]. Sin embargo, debido a su estructura hidrofílica, el rastrojo tiende a absorber humedad, lo que puede afectar las propiedades mecánicas del compuesto final, requiriendo tratamientos previos como la acetilación para mejorar su compatibilidad con los biopolímeros.

Para determinar cuál de los tres biopolímeros seleccionados (PLA, Ecoflex® F Blend C1200 y Ecovio®) ofrece el mejor rendimiento para la fabricación de plastiflechas biodegradables, se ha elaborado una matriz en donde se aplicará el Método de Evaluación Multicriterio (MCDM), este método permite comparar diferentes materiales en función de criterios clave. Con esta herramienta es posible identificar qué biopolímero maximiza la eficiencia y la sostenibilidad del proyecto. Además, la información contenida en la **sección 4.1.1** es parte esencial para completar esta matriz, ya que proporciona detalles técnicos esenciales sobre las propiedades de los biopolímeros seleccionados.

Tabla 2. Evaluación Multicriterio (MCDM) para determinar el rendimiento de la fabricación de plastiflechas biodegradables [Elaboración propia].

| Criterios | Peso (%) | Biopolímeros seleccionados | | |
|--|------------------|----------------------------|---------|--------|
| | | PLA | Ecoflex | Ecovio |
| Resistencia mecánica | 12 | 1 | -1 | 0 |
| Propiedades de procesamiento | 8 | 1 | 0 | 1 |
| Biodegradabilidad | 15 | 0 | 0 | 1 |
| Flexibilidad | 8 | 0 | 1 | 0 |
| Reología | 10 | 0 | 1 | 1 |
| Compatibilidad con los procesos | 4 | 1 | 1 | 1 |
| Disponibilidad | 4 | 1 | 0 | 0 |
| Costo | 6 | 1 | -1 | 0 |
| Compatibilidad con el rastrojo de piña | 14 | 1 | 1 | 1 |
| Huella ecológica | 15 | 0 | 1 | 1 |
| Normativas y certificaciones | 4 | 0 | 0 | 1 |
| | Evaluación total | 48% | 33 % | 70 % |

Según los resultados visibles en el análisis de multicriterios, el biopolímero Ecovio® obtiene la puntuación más alta (70 %), lo que indica que, según este análisis, es el material más adecuado para el proyecto en función de los criterios establecidos. Le sigue de cerca el PLA, que también presenta una alta viabilidad dependiendo de las prioridades del proyecto.

4.2. Análisis de las especificaciones del molde

Para la sección de las normativas actuales relacionadas con la fabricación y el uso del molde, en la **sección 2.5** se realizó una revisión bibliográfica de las normas clave a las que se debe prestar atención. La importancia de esto radica en garantizar que tanto el proceso de fabricación como los materiales utilizados cumplan con las regulaciones de seguridad,

medioambientales y de biodegradabilidad. Estas normativas son esenciales para asegurar que el producto terminado, en este caso las plastiflechas biodegradables, no solo cumpla con los estándares de calidad, sino que también sea aceptable en mercados internacionales y respetuoso con el medio ambiente. Esto incluye la normativa relacionada con la compostabilidad, contacto con alimentos y la certificación de productos biodegradables, aspectos críticos para la aceptación y comercialización del producto.

Con respecto a los procesamientos y las condiciones de enfriamiento y desmoldeo, se utilizarán las fichas técnicas que se encuentran en la sección de anexos para cada uno de los polímeros seleccionados (PLA, Ecoflex y Ecovio). Estas fichas proporcionarán los parámetros iniciales necesarios para asegurar un moldeo adecuado. En algunos casos, los datos específicos sobre el comportamiento de los materiales se obtendrán a través de las simulaciones, cuyos resultados se analizarán en la *sección 4.3*. De igual modo, en esta sección se encuentra la **tabla 3**, la cual resume los parámetros utilizados en cada caso.

4.3. Simulaciones computacionales

En esta sección, se presentan dos propuestas de diseño para el conjunto de plastiflechas. Cada diseño fue desarrollado con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso de inyección y la calidad final del producto. Posteriormente, se realizaron simulaciones computacionales con los tres biopolímeros utilizando el software Moldex3D para evaluar el desempeño de cada propuesta. A continuación, se detallan las características principales de los diseños propuestos y se analizan los resultados de las simulaciones computacionales.

4.3.1. Propuestas de diseño para el conjunto de plastiflechas biodegradables

Para las dos propuestas se consideraron diferentes configuraciones en los puntos de inyección, para optimizar el proceso de producción de plastiflechas biodegradables. En la **propuesta 1 (figura 6.a)**, se contemplaron dos puntos de inyección, lo que permite un llenado más eficiente y equilibrado del molde. En la **propuesta 2 (figura 6.b)**, el molde se diseñó con un solo punto de inyección conectado a través de un canal que distribuye el material de manera uniforme a todas las cavidades. Ambos diseños están optimizados para la producción de un conjunto de 15 plastiflechas.

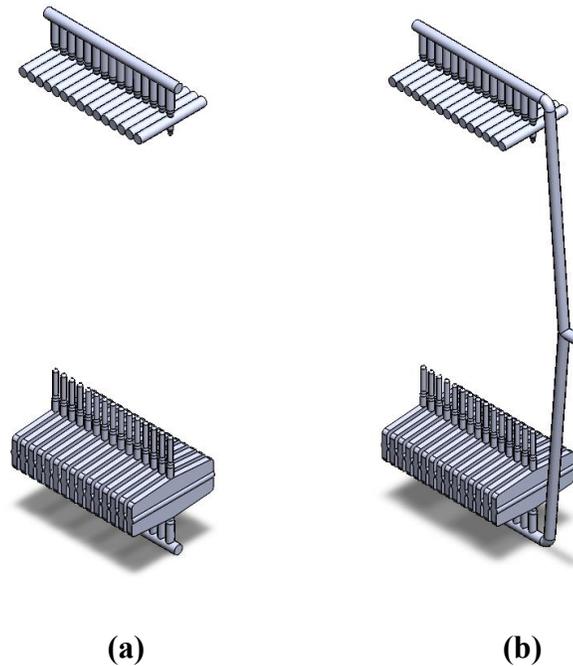


Figura 6. Diseño del conjunto de plastiflechas **(a)** Propuesta 1 **(b)** Propuesta 2 [Elaboración propia].

Mientras que la **propuesta 1** busca mejorar el control del flujo en múltiples puntos, la **propuesta 2** simplifica el proceso de inyección y reduce posibles inconsistencias en el llenado. En la **sección 4.3.2**, se verificará el comportamiento de los materiales durante la inyección, evaluando parámetros como el flujo, la temperatura, la presión y el tiempo, mediante simulaciones computacionales. Los resultados de estas simulaciones permitirán comparar ambos diseños y determinar cuál es óptimo para la fabricación del molde, evaluando factores clave como la eficiencia, la calidad del producto y la viabilidad del proceso. Cabe destacar que el espacio que se visualiza en el diseño está destinado a contener el rastrojo de piña.

4.3.2. Resultados de las simulaciones computacionales

4.3.2.1 Propuestas

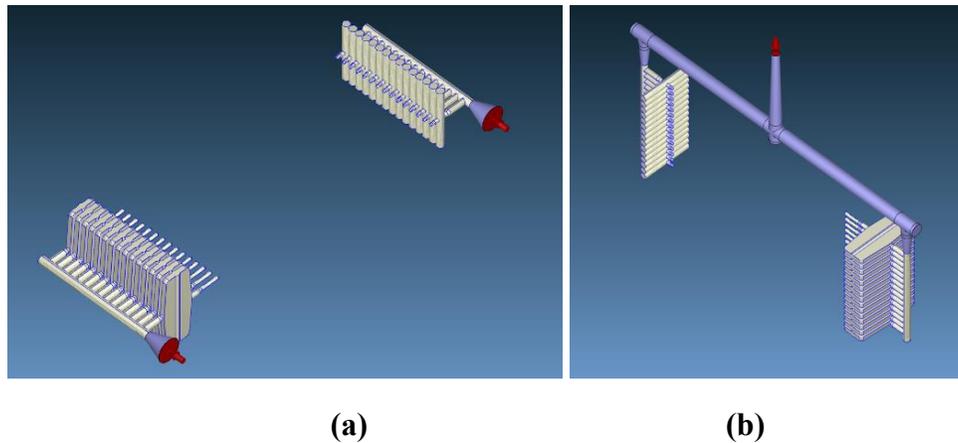


Figura 7. Modelo (a) Propuesta 1 (b) Propuesta 2 [Elaboración propia].

Es importante mencionar que todas las imágenes de las simulaciones computacionales realizadas para este proyecto se encuentran incluidas en los **anexos**. Estas imágenes brindan un detalle visual completo de los resultados y permiten una mejor comprensión de los diferentes aspectos evaluados durante las simulaciones.

Comparación de los resultados de llenado, compactación, deformación y enfriamiento para PLA, Ecoflex® F Blend C1200 y Ecovio® de las propuestas

Para el análisis del Ácido Poliláctico (PLA), Ecoflex® F Blend C1200 y Ecovio®, se estableció una serie de parámetros clave que garantizan la correcta ejecución del proceso de moldeo por inyección. Estos parámetros incluyen condiciones de llenado, compactación y enfriamiento, entre otros; los cuales son esenciales para asegurar la eficiencia del ciclo de producción. Para ambas propuestas se emplearon los mismos parámetros, con el propósito de asegurar una comparación justa entre los biopolímeros y el diseño de las propuestas, el único parámetro que varía debido al diseño entre los tres biopolímeros es el volumen de inyección, el cual tiene un valor de 0.66 cm^3 . A continuación, en la **tabla 3** se detallan los principales parámetros establecidos para cada uno de los materiales.

Tabla 3. Comparación de parámetros establecidos para PLA, Ecoflex® F Blend C1200 y Ecovio® [Elaboración propia].

| Parámetro | Valor | | |
|-----------------------------------|-------|------------------------|---------|
| | PLA | Ecoflex® F Blend C1200 | Ecovio® |
| Tiempo de llenado (s) | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| Temperatura de fusión (°C) | 170 | 115 | 195 |
| Temperatura del molde (°C) | 25 | 45 | 30 |
| Presión máxima de inyección (MPa) | 120 | 150 | 148 |
| Volumen de inyección (cm³) | 0.51 | 0.51 | 0.51 |
| Tiempo de compactación (s) | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Presión máxima de compactación | 120 | 120 | 130 |
| Tiempo de enfriamiento (s) | 10.6 | 10.6 | 10.6 |
| Tiempo de apertura del molde (s) | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Temperatura de expulsión (°C) | 55 | 55 | 55 |
| Temperatura del aire (°C) | 25 | 25 | 25 |
| Tiempo de ciclo (s) | 18.7 | 18.7 | 18.7 |

Proceso de llenado (“Filling”)

Temperatura y tiempo de llenado

El análisis del tiempo de llenado para el prototipo 1 (**figura 12**) en los tres casos muestra resultados similares en términos de eficiencia. Para el PLA, el llenado se completó en 0.117 segundos, con una temperatura promedio del frente de la masa fundida de 195.792°C y un máximo de 199.642°C. Por otro lado, el Ecoflex presentó un tiempo de llenado de 0.112 segundos, con una temperatura promedio de 117.99 °C y un valor máximo de 121.79 °C, lo que indica un comportamiento adecuado dentro del rango del material. Finalmente, el Ecovio completó el llenado en 0.112 segundos, con una temperatura promedio de 162.627 °C y un máximo de 200.882 °C.

Para el prototipo 2 (**figura 13**), se registraron diferencias notables entre los tres biopolímeros. Inicialmente, el PLA presentó un tiempo de llenado de 0.130 segundos y una temperatura promedio de 201.140 °C, siendo 206.857 °C la temperatura máxima a la que llegó, a lo largo del proceso de llenado el PLA se destacó por mantener una viscosidad

adecuada a lo largo del proceso de inyección, lo cual evita la degradación térmica y garantiza un llenado eficiente. En comparación, el Ecoflex, registró una temperatura promedio más baja de 124.084°C y un tiempo de llenado ligeramente mayor de 0.132 segundos, lo que indica que este biopolímero tiene una mayor fluidez a temperaturas más bajas, pero requiere un tiempo adicional para llenar completamente el molde. Finalmente, el Ecovio, se posiciona como el biopolímero más eficiente en términos de tiempo de llenado, registrando 0.127 segundos, el más bajo entre los tres. Su temperatura promedio de 217.704 °C le permite mantener una fluidez adecuada durante todo el proceso de llenado, sin riesgo de solidificación temprana.

Estos resultados sugieren que los tres polímeros ofrecen tiempos de llenado rápidos y consistentes, adecuados para aplicaciones de moldeo por inyección en piezas pequeñas, como las plastiflechas. Además, las temperaturas de llenado se encuentran dentro de los rangos óptimos para cada material, lo que asegura un flujo adecuado y una baja probabilidad de defectos relacionados con el sobrecalentamiento o enfriamiento. Se puede visualizar una diferencia entre ambos prototipos siendo el prototipo 1 el que mantiene márgenes más rápidos, lo que sugiere una mayor eficiencia en la producción.

Presión de llenado

Durante la etapa de llenado del prototipo 1 (**figura 14**), los tres polímeros registraron presiones distintas, reflejando las variaciones en sus propiedades. El PLA presentó una presión de aproximadamente 82.071 MPa, dentro del rango de operación normal. Este valor lo que indica es que el proceso de inyección operó de manera eficiente, lo que asegura que el material llenara el molde sin excesos de presión. Además, se precisa que el volumen total inyectado estuvo entre 30 MPa y 115 MPa, es importante tomar estos rangos en cuenta debido a que garantizan que la presión es suficientemente alta para llenar la cavidad de manera completa, pero sin excederse al punto de generar defectos como rebabas.

El Ecoflex, por otro lado, alcanzó una presión promedio de alrededor de 111.712 MPa. Esta presión es adecuada para este biopolímero, cuyo límite máximo de presión es de aproximadamente 150 MPa. La simulación muestra que, aunque la presión fue más elevada que en el caso del PLA, el Ecoflex mantuvo un buen comportamiento, sin riesgo de sobrellenado o formación de rebabas.

Finalmente, el Ecovio registró una presión promedio de 102.778 MPa. Esta presión, al igual que en los dos casos anteriores está dentro de un rango seguro para este biopolímero, cuyo límite máximo permitido es 148 MPa. El Ecovio demostró un rendimiento óptimo durante el proceso de llenado, lo que sugiere que el material tiene una excelente capacidad para mantener una buena estabilidad de flujo durante el proceso de inyección. Asimismo, en el histograma se logra apreciar que existió una presión uniforme, lo cual garantiza una fluidez adecuada del material y minimiza el riesgo de defectos en la pieza final.

Para el prototipo 2 (**figura 15**), se mostró que el PLA presentó una presión de aproximadamente 61.504 MPa, debido al rango establecido para este biopolímero, este valor indica un proceso de inyección eficiente y bien controlado. El Ecoflex, por su parte, alcanzó una presión promedio de 77.511 MPa. Aunque la presión promedio es más elevada que la del PLA, sigue siendo adecuada para este biopolímero, cuyo límite máximo de presión es de aproximadamente 150 MPa. A pesar de la mayor presión, el Ecoflex demostró una adaptabilidad moderada durante el proceso, lo que permitió un llenado preciso sin comprometer la fluidez del material.

Finalmente, en el caso del Ecovio, este registró que aproximadamente un 70 % del volumen total fue inyectado en un rango entre 30 MPa y 130 MPa, lo cual sugiere un llenado consistente. La presión promedio de 84.237 MPa, lo cual lo posiciona como el biopolímero que soporta una presión más elevada entre los tres, aunque sigue estando dentro de un rango seguro, dado que su límite máximo es de 148 MPa. Esto indica que el Ecovio es un material altamente resistente, capaz de manejar condiciones de presión más exigentes sin comprometer su desempeño o integridad estructural.

Se puede observar que en el caso del prototipo 1, la presión promedio de los tres biopolímeros es más alta que en el prototipo 2, esto se puede deber a la diferencia en la geometría del diseño. El prototipo 1 presenta un diseño que genera mayores restricciones al flujo, lo que aumenta la presión promedio necesaria para el llenado. En cambio, el prototipo 2, con un diseño menos restrictivo, permite que los polímeros fluyan con menos resistencia, resultando en una presión promedio más baja. Con base en los resultados, cada biopolímero se ajusta a diferentes aplicaciones, el Ecovio ofrece un buen equilibrio entre resistencia y

estabilidad, mientras que el Ecoflex es adecuado para presiones más altas, y el PLA para presiones más bajas, manteniendo estabilidad y eficiencia en aplicaciones menos exigentes.

Velocidad de llenado

Con respecto al análisis de la velocidad de llenado del prototipo 1 (**figura 16**), se observa que cada material presenta un comportamiento distinto durante el proceso de inyección. El PLA tiene una velocidad máxima de 587.579 cm/s y una velocidad promedio de 7.009 cm/s, lo que indica un flujo relativamente estable, con una desviación estándar de 41.172, que es considerablemente menor, en comparación con los otros dos biopolímeros, lo que refleja un flujo más uniforme y controlado a lo largo del proceso. Esta uniformidad en el flujo sugiere que el PLA es el más adecuado para aplicaciones que requieren un llenado más lento y constante, reduciendo el riesgo de defectos asociados con variaciones de velocidad.

Por otro lado, el Ecovio muestra una velocidad máxima de 911.089 cm/s, con una velocidad promedio de 11.326 cm/s y una desviación estándar de 65.949 cm/s. Este biopolímero parece adecuado para procesos que requieren un llenado rápido, aunque, es importante monitorear las variaciones en el flujo debido a la desviación estándar, ya que podrían generar problemas en la calidad final de la pieza moldeada si no se controlan adecuadamente.

En contraste, el Ecoflex presenta una velocidad máxima menor que el Ecovio, pero superior a la del PLA, con un valor de 789.516 cm/s, una velocidad promedio de 8.613 cm/s. Además, su desviación estándar tiene un valor de 47.135 cm/s. Estos valores lo posicionan en el medio de ambos biopolímeros (PLA y Ecovio).

En conclusión, el Ecovio destaca por su velocidad de llenado. El Ecoflex ofrece un buen balance entre velocidad y estabilidad, mientras que el PLA se caracteriza por su uniformidad y control, siendo ideal para aplicaciones que priorizan la consistencia sobre la velocidad.

Para el prototipo 2 (**figura 17**), el PLA alcanza una velocidad máxima de llenado de 673.269 cm/s, con un promedio de 20.121 cm/s, lo cual es beneficioso en términos de eficiencia y asegura que el material se distribuya rápidamente sin inestabilidades. Cabe destacar que se mencionan ambos valores, debido a que la velocidad máxima refleja el punto

más exigente del proceso, mientras que el promedio indica cómo se comporta el material a lo largo de todo el ciclo de llenado.

En el caso del Ecoflex, este muestra una velocidad máxima de 644.401 cm/s, y una velocidad promedio de 23.28 cm/s, lo cual determina una menor velocidad, en contraste al PLA, esto podría generar un proceso de llenado más estable, pero más lento. Por último, el Ecovio, presenta una velocidad máxima de 578.545 cm/s, y una velocidad promedio de 17.63 cm/s. Este biopolímero presenta el valor más bajo entre los tres analizados, lo que podría implicar que, aunque tiene una velocidad promedio reducida, su comportamiento más controlado durante el llenado del molde puede favorecer una mayor precisión en la formación del producto.

Tasa de flujo

Otro punto relevante en el parámetro de llenado es la tasa de flujo, para el prototipo 1 en los tres biopolímeros se visualizan valores bastante similares, lo que refleja la eficiencia del sistema de llenado en todos los casos. El Ecoflex, con una tasa de 5.184 cc/seg, garantiza un llenado eficiente y rápido. Por otro lado, El Ecovio y el PLA registraron una tasa de 5.142 cc/seg, lo que asegura un flujo controlado, esto podría evitar el aumento excesivo de presión, minimizando el riesgo de defectos como rebabas.

Seguidamente para el prototipo 2, el Ecovio presenta un caudal de 6.554 cc/seg lo que asegura un llenado eficiente y controlado. En el caso del PLA y el Ecoflex presentan caudales de flujo similares, el PLA con un valor de 6.541 cc/seg y el Ecoflex con 6.546 cc/seg, lo cual permite que se mantenga un rendimiento comparable con respecto al Ecovio. Esto sugiere que, en términos de flujo, los tres materiales tienen capacidades similares, aunque sus otras características diferencian su aplicabilidad en distintos procesos industriales.

Proceso de compactación (“Packing”)

En el parámetro de compactación, se observan diferencias significativas en términos de presión, temperatura, y fuerza de cierre. Para el prototipo 1 (**figura 18**), el PLA presentó una presión máxima de 120 MPa y una temperatura de compactación de 188.109 °C, con un tiempo de compactación de 3 segundos, este valor se mantiene en los 6 casos. Estas

condiciones son adecuadas para mantener una densidad homogénea, minimizando defectos como vacíos internos o marcas de hundimiento. La fuerza de cierre (**figura 19**) registrada para el PLA fue de 1.503 toneladas, lo que sugiere que el proceso se desarrolló dentro de un rango seguro para evitar deformaciones en la cavidad del molde.

Por otro lado, el Ecoflex alcanzó una presión máxima de 120 MPa y una temperatura de compactación de 109.407°C. Este biopolímero tiene la misma presión que el PLA, con una fuerza de cierre máxima registrada de 1.841 toneladas, lo cual indica que ambos materiales requieren condiciones de procesamiento similares en términos de presión y fuerza de cierre. Sin embargo, la diferencia en la temperatura de compactación sugiere que el Ecoflex podría ser más adecuado para aplicaciones donde se necesita una mayor flexibilidad térmica sin comprometer la integridad estructural del material durante el proceso de moldeo.

Finalmente, el Ecovio mostró una presión de 130 MPa, con una temperatura de compactación de 186.814 °C. Este material soporta una mayor presión durante la fase de compactación, lo que sugiere que es más exigente en términos de fuerza de cierre, que en este caso fue de 1.917 toneladas, la más alta de los tres biopolímeros. A pesar de las mayores demandas, las condiciones operativas de Ecovio permiten mantener una densidad óptima durante el enfriamiento, reduciendo el riesgo de defectos internos o superficiales. Además, la alta fuerza de cierre asegura una correcta compactación sin comprometer la estabilidad mecánica del molde.

Para el prototipo 2 (**figura 20**), el PLA presentó una presión máxima de 120 MPa y una temperatura de compactación de 37.145 °C, lo que aseguró un buen flujo y distribución dentro de la cavidad del molde. La fuerza de cierre registrada para el PLA fue de 2.196 toneladas, lo que permitió un molde cerrado de manera segura sin rebabas. Por otro lado, el Ecoflex mostró una presión de 120 MPa, con una temperatura de compactación promedio de 48.744°C, manteniendo la estabilidad del material. Además, presentó una fuerza de cierre de 2.935 toneladas. Finalmente, el Ecovio presentó las condiciones más exigentes, con una presión de 130 MPa y una temperatura de 41.994 °C, pero requiriendo una fuerza de cierre significativamente mayor, de 3.746 toneladas, debido a la alta presión aplicada durante la compactación.

Al analizar ambos prototipos se puede observar que el prototipo 1 tiene mejores resultados en los parámetros analizados. En este caso los tres biopolímeros ofrecen buenas condiciones de proceso para aplicaciones que no requieren presiones muy elevadas, siendo materiales más flexibles y fáciles de manejar en términos de temperatura y fuerza de cierre.

Proceso de deformación (“Warping”)

En el análisis comparativo de la deformación de los tres biopolímeros en el prototipo 1 (**figura 22**) el PLA presentó el menor desplazamiento máximo con 0.147 mm, lo que indica una gran estabilidad dimensional. El Ecoflex, por otro lado, tuvo el mayor desplazamiento con 0.364 mm. Por último, se tiene al Ecovio, el cual mostró un desplazamiento intermedio de 0.299 mm. Posteriormente, para el análisis del prototipo 2 (**figura 23**) el PLA presentó el menor desplazamiento máximo con 0.129 mm. El Ecoflex mostró un desplazamiento mayor, alcanzando 0.300 mm. El Ecovio, presentó un desplazamiento máximo de 0.271 mm. Cabe destacar que en los seis casos las componentes de desplazamiento en los ejes X, Y y Z fueron mínimas, asegurando que el material mantenga una integridad estructural sólida después del desmoldeo.

En esta sección, se logró visualizar que el PLA se destacó como el material con mejor rendimiento en términos de menor deformación y mayor estabilidad dimensional, haciéndolo ideal para aplicaciones donde se requiera un control más estricto sobre las dimensiones finales de las piezas moldeadas. El Ecoflex presentó la mayor deformación, pero aún dentro de un rango manejable, mientras que el Ecovio demostró ser una opción equilibrada con un comportamiento de deformación intermedio, ofreciendo una buena estabilidad dimensional.

Proceso de enfriamiento (“Cooling”)

En el análisis comparativo del proceso de enfriamiento del prototipo 1 entre los tres biopolímeros (**figura 24**), el PLA mostró una temperatura máxima de 26.265 °C y una mínima de 25.349 °C, con una temperatura promedio de 25.967 °C, lo que refleja un enfriamiento uniforme y un control térmico adecuado, con una desviación estándar de 0.283. Por su parte, el Ecoflex, alcanzó temperaturas más altas, con una máxima de 45.455°C y una mínima de 45.108°C, y una temperatura promedio de 45.340°C, lo que indica un mayor rango térmico y una menor variabilidad, reflejada en su desviación estándar de 0.106. Finalmente, el Ecovio presentó una temperatura máxima de 31.250 °C y una mínima de 30.340 °C, con

una temperatura promedio de 30.953 °C y una desviación estándar de 0.280, lo que indica un enfriamiento equilibrado y similar al PLA, aunque con un rango de temperaturas ligeramente elevadas.

En el análisis del proceso de enfriamiento para el prototipo 2 (**figura 25**), se observaron diferencias en las temperaturas. El PLA presentó una temperatura máxima de 26.263 °C, con una temperatura promedio de 25.941 °C, además, esta presenta una desviación estándar de 0.242 °C. Por otro lado, el Ecoflex mostró la mayor temperatura de enfriamiento, con una máxima de 45.521°C, un promedio de 45.380°C y una desviación estándar mucho más baja de 0.106°C, lo que refleja una estabilidad térmica aún más precisa. Por último, el Ecovio registró una temperatura máxima de 31.339 °C, y un promedio de 30.367 °C, con una desviación estándar de 0.276.

En síntesis, el análisis del proceso de enfriamiento muestra que los tres biopolímeros en ambos prototipos son favorables, sin embargo, el Ecoflex por la temperatura tan elevada podría perjudicar el tiempo de ciclo. Por lo tanto, el PLA y el Ecovio ofrecen un enfriamiento más equilibrado y eficiente, con temperaturas promedio similares y un control térmico adecuado que evita tensiones térmicas y problemas de contracción en las piezas moldeadas.

Seguidamente, se presentará una tabla resumen con cada uno de los aspectos evaluados en esta sección.

Tabla 4. Resumen de los resultados de las simulaciones de los tres biopolímeros (PLA, Ecoflex y Ecovio) [Elaboración propia].

| Biopolímero / Proceso | Prototipo 1 | | | | Prototipo 2 | | | |
|-----------------------|---|--|---|-------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|
| | Proceso de llenado | Proceso de compactación | Proceso de enfriamiento | Proceso de deformación | Proceso de llenado | Proceso de compactación | Proceso de enfriamiento | Proceso de deformación |
| PLA | Temperatura : 195.792 °C Tiempo: 0.117 s Velocidad máxima: 587.579 cm/s Presión promedio: 82.071 MPa Tasa de flujo: 5.142 cc/seg | Temperatura : 188.109 °C Presión máxima: 120 MPa Presión promedio: 3.136 MPa Tiempo: 3 s Fuerza de cierre: 1.503 toneladas | Temperatura promedio: 25.967 °C | Desplazamiento : 0.147 mm | Temperatura : 201.140°C Tiempo: 0.128 s Velocidad máxima: 673.269 cm/s Presión promedio: 61.504 MPa Tasa de flujo: 6.541 cc/seg | Temperatura : 166.122 °C Presión máxima: 120 MPa Presión promedio: 0.735 MPa Tiempo: 3 s Fuerza de cierre: 2.196 toneladas | Temperatura promedio: 25.941 °C | Desplazamiento : 0.129 mm |
| Ecoflex | Temperatura : 117.99 °C Tiempo: 0.112 s Velocidad máxima: 789.516 cm/s Presión promedio: 111.712 MPa Tasa de flujo: 5.184 cc/seg | Temperatura : 109.407 °C Presión máxima: 120 MPa Presión promedio: 61.253 MPa Tiempo: 3 s Fuerza de cierre: 1.841 toneladas | Temperatura promedio: 45.340 °C | Desplazamiento : 0.364 mm | Temperatura : 124.084°C Tiempo: 0.130 s Velocidad máxima: 644.401 cm/s Presión promedio: 71.511 MPa Tasa de flujo: 6.546 cc/seg | Temperatura : 48.744°C Presión máxima: 120 MPa Presión promedio: 30.991 MPa Tiempo: 3 s Fuerza de cierre: 2.935 toneladas | Temperatura promedio: 45.380°C | Desplazamiento : 0.300 mm |
| Ecovio | Temperatura : 162.627 °C Tiempo: 0.112 s Velocidad máxima: 911.089 cm/s Presión promedio: 102.778 MPa Tasa de flujo: 5.142 cc/seg | Temperatura : 186.814 °C Presión máxima: 130 MPa Presión promedio: 4.860 MPa Tiempo: 3 s Fuerza de cierre: 1.917 toneladas | Temperatura promedio: 30.953 °C | Desplazamiento : 0.299 mm | Temperatura : 217.704 °C Tiempo: 0.127 s Velocidad máxima: 578.545 cm/s Presión promedio: 84.237 MPa Tasa de flujo: 6.554 cc/seg | Temperatura : 160.212 °C Presión máxima: 130 MPa Presión promedio: 2.291 MPa Tiempo: 3 s Fuerza de cierre: 3.746 toneladas | Temperatura promedio: 30.982 °C | Desplazamiento : 0.271 mm |

Biopolímero seleccionado y propuesta de diseño elegida

Según los resultados de la **sección 4.3.2** y los datos de la **tabla 4** y la **figura 11**, se selecciona el biopolímero **Ecovio** y el **prototipo 1**, como la combinación más óptima para el desarrollo del prototipo. Esta elección se basó en el desempeño superior del Ecovio en términos de equilibrio entre las propiedades mecánicas, térmicas y de biodegradabilidad, así como en la efectividad de la propuesta 1 para garantizar un proceso de moldeo más eficiente, con mejor control en el llenado, compactación, enfriamiento y menor deformación del material.

El Ecovio se presenta como el biopolímero más equilibrado entre las tres opciones. Aunque el PLA destaca por sus propiedades de compactación y el Ecoflex por su baja temperatura de procesamiento, el Ecovio logra un balance óptimo entre estos factores, ofreciendo una velocidad de llenado adecuada, una presión de compactación eficiente y una temperatura moderada de procesamiento. Además, cuando se trata de biodegradabilidad, el Ecovio sobresale como el material que cumple mejor con los estándares, proporcionando una solución compostable y sostenible sin comprometer la calidad del producto. Su capacidad para ajustarse a los requerimientos tanto de rendimiento como de sostenibilidad, lo convierte en la opción más completa.

4.4. Diseño del molde

El diseño del molde para la producción de plastiflechas se ha realizado con el objetivo de optimizar la fabricación en un conjunto de 15 unidades por ciclo de inyección. El molde ha sido configurado para permitir un llenado uniforme y preciso en cada cavidad, asegurando que todas las plastiflechas mantengan las mismas características de calidad en términos de dimensiones, resistencia y biodegradabilidad. Para lograr esto, se tomaron en cuenta las características del biopolímero seleccionado, como el valor de contracción, estimado en 0.20 %. Además, se integraron simulaciones computacionales que permiten prever posibles defectos en el llenado o en el desmoldeo, lo que facilitó los ajustes precisos en el diseño, tales como la ubicación de los canales de inyección y el diseño de las cavidades.

En la **figura 8**, se pueden observar las dos piezas principales del sistema de acoplamiento: la pieza A y la pieza B. Ambas piezas cuentan con dos orificios en los que se

insertan pasadores. En la pieza A (**figura 8.a**), el pasador se ajusta mediante un ajuste de interferencia, mientras que en la pieza B (**figura 8.b**), el pasador tiene un ajuste deslizante. Este tipo de diseño asegura una conexión precisa y segura, garantizando que ambas piezas se mantengan unidas sin holguras ni desplazamientos durante su uso. Asimismo, se utilizará una prensa tipo C, para asegurar que el encaje entre ambas piezas sea más exacto.

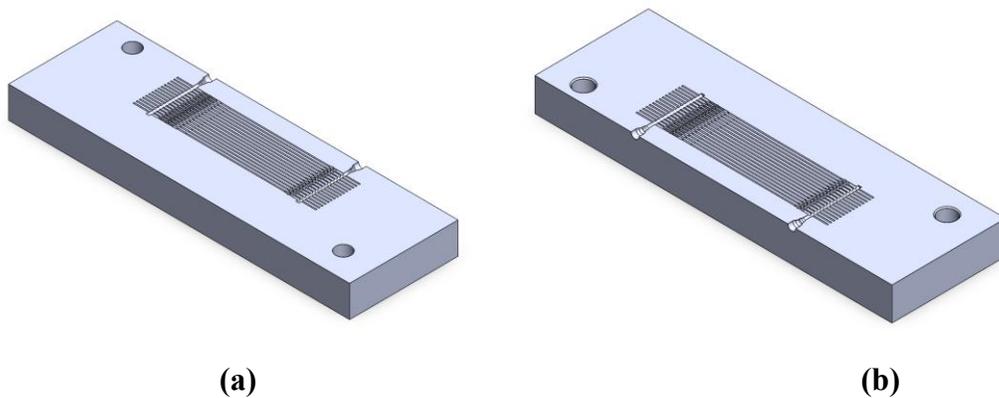


Figura 8. Componentes del molde (a) Pieza A (b) Pieza B [Elaboración propia].

En la **figura 9**, se visualiza con más precisión el diseño interno del molde. En donde la **sección A** esta destinada a la boquilla de inyección para el polímero, asegurando que el material fluya de manera adecuada hacia las cavidades del molde. Por otro lado, la **sección B**, corresponde al área destinada para el rastrojo de pña, un componente clave en la fabricación de las plastiflechas biodegradables. Este diseño permite una distribución eficiente de ambos materiales, garantizando la calidad y consistencia del producto.

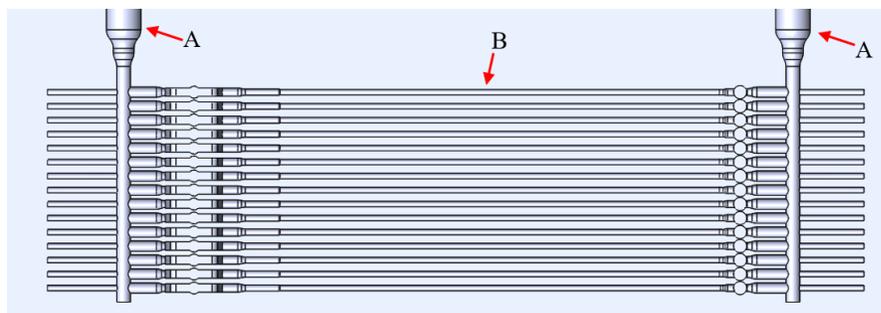


Figura 9. Vista interna del molde [Elaboración propia].

Seguidamente, en la **figura 10**, se presenta un croquis del molde en el que se puede visualizar claramente el ensamble.

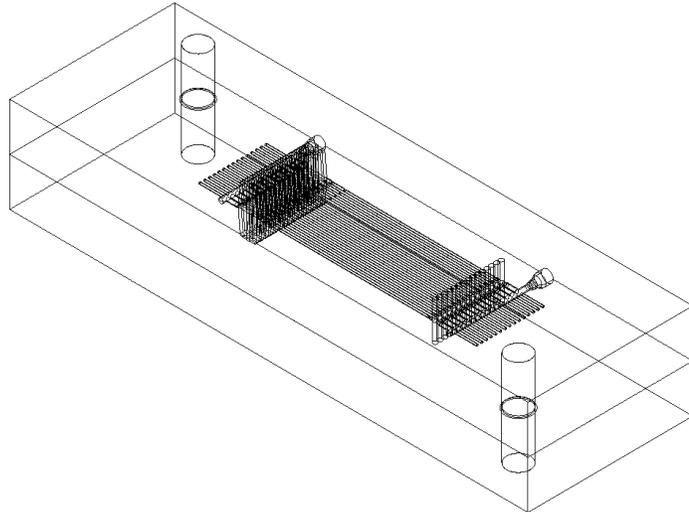


Figura 10. Croquis del molde [Elaboración propia].

Se destaca que el diseño del molde cuenta con puntos críticos que se han tomado en cuenta para optimizar su desempeño y evitar inconvenientes durante el proceso de inyección. En la pieza B, se incluyeron chaflanes en los dos agujeros donde va insertada en la pieza A para aligerar la tensión en las áreas de intersección, lo que previene posibles fracturas prematuras en el molde, ya que son zonas de bastante contacto. Además, se reforzaron las zonas de mayor presión, utilizando radios en lugar de esquinas agudas para mejorar la distribución de las fuerzas y evitar concentraciones de esfuerzo. Estas medidas no solo aumentan la vida útil del molde, sino que también mejoran la calidad final de las plastiflechas, garantizando una producción más estable y eficiente.

4.5. Fabricación del prototipo del molde

En esta sección se analizarán dos elementos clave para la fabricación del molde: la determinación del proceso de fabricación más eficiente y la selección de materiales adecuados. Primero, se evaluarán tecnologías como el moldeo por inyección y el moldeo por compresión, considerando factores como el tiempo de ciclo, la calidad de las piezas, la complejidad del diseño del molde y la viabilidad económica. Luego, se revisarán los materiales óptimos para el molde, analizando su resistencia, durabilidad, y compatibilidad con los biopolímeros, así como su disponibilidad y costo, para garantizar la viabilidad del proceso.

4.5.1. Proceso de fabricación para el molde

En la **sección 2.4** se explica el funcionamiento tanto del moldeo por inyección como del moldeo por compresión, dos procesos clave en la manufactura de piezas poliméricas. El moldeo por inyección es un proceso que destaca por su tiempo de ciclo corto, permitiendo la producción eficiente de grandes volúmenes de piezas, que lo hace ideal para la manufactura a gran escala. Sin embargo, su diseño de molde es más complejo y costoso, aunque asegura la producción de piezas altamente precisas y uniformes. A pesar de la alta inversión inicial, su viabilidad económica es notable en proyectos de gran volumen [53]. Por otro lado, el moldeo por compresión, aunque tiene un tiempo de ciclo más largo, es adecuado para producir piezas más resistentes mecánicamente, aunque con menor complejidad en sus formas. Su diseño de molde es menos costoso, lo que lo hace atractivo en proyectos con menor volumen de producción o cuando se utilizan materiales de mayor dureza [54].

Por otro lado, se encuentran el moldeo por extrusión y el moldeo por soplado, dos procesos incorporados en diversas industrias debido a su capacidad para producir productos continuos o huecos de manera eficiente. Sin embargo, en el contexto de este proyecto no son los procesos más adecuados, ya que se enfocan principalmente en la fabricación de productos de sección constante, como tubos o perfiles (en el caso de la extrusión), o productos huecos, como botellas o recipientes (en el caso del soplado). En este proyecto, que requiere la fabricación de plastiflechas biodegradables, estos métodos no son los más eficientes, dado que la geometría y las especificaciones del producto no corresponden a lo que estos procesos pueden ofrecer. Por lo tanto, se descartan a favor de técnicas más adecuadas para piezas con formas más complejas y requisitos mecánicos específicos, como el moldeo por inyección y el moldeo por compresión, debido a esto se realizará una matriz de multicriterio que evaluará cuatro aspectos esenciales, permitiendo un análisis estructurado para determinar la opción más eficiente.

Tabla 5. Evaluación Multicriterio (MCDM) para determinar la opción más eficiente en términos de tecnología de fabricación [Elaboración propia].

| Criterios | Peso (%) | Técnicas de moldeo | |
|----------------------------------|----------|----------------------|-----------------------|
| | | Moldeo por inyección | Moldeo por compresión |
| Tiempo de ciclo | 23 | 1 | -1 |
| Calidad de las piezas producidas | 30 | 1 | 0 |
| Complejidad del diseño del molde | 20 | -1 | 1 |
| Viabilidad económica | 27 | 0 | 1 |
| Evaluación total | | 33 % | 24 % |

Según la **Tabla 5**, se puede observar que el moldeo por inyección resulta ser la opción más eficiente, obteniendo una evaluación total del 33%, en comparación con el moldeo por compresión, que alcanza un 24%. Esto se debe a que el moldeo por inyección ofrece ventajas clave en términos de tiempo de ciclo y calidad de las piezas producidas, que lo convierten en la opción más adecuada.

4.5.2. Selección de materiales para la fabricación del molde

En la selección de materiales para la fabricación del molde, además de evaluar su resistencia al desgaste y su compatibilidad con el Ecovio, es fundamental considerar el aspecto de la disponibilidad local al inicio del proyecto. Para esta sección se consideran tres opciones: acero NAK80, aluminio y el acero P20.

El **acero NAK80**, ofrece alta resistencia térmica y estabilidad dimensional, además de un excelente acabado superficial, lo que lo hace perfecto para moldes de larga duración y precisión [55]. Sin embargo, su disponibilidad limitada en Costa Rica implica mayores costos y tiempos de importación, lo que lo hace menos práctico para este proyecto.

Otra opción es el **aluminio**, que es menos costoso y más fácil de mecanizar, lo que lo hace ideal para prototipos o producciones de bajo volumen [55]. Aunque tiene buena conductividad térmica, su resistencia al desgaste es menor en comparación con aceros como el P20, lo que puede requerir recubrimientos adicionales para mejorar su durabilidad.

Finalmente, el **acero P20** destaca como una de las mejores opciones debido a su resistencia a la corrosión, durabilidad y disponibilidad en Costa Rica [56]. Su combinación

de buen rendimiento en ciclos repetidos de producción y costo accesible lo convierte en la opción ideal para moldes de producción media y alta. Además, su fácil acceso en el mercado local reduce costos logísticos y tiempos de entrega, haciéndolo aún más conveniente.

4.6. Evaluación de los costos de producción

En esta sección se analizará la evaluación de los costos de producción, abordando en detalle los costos de los materiales, los costos fijos y variables, y, finalmente, la viabilidad económica del proyecto.

4.6.1. Identificar los costos de materiales

Con el fin de determinar cuál es el costo total por pieza se debe realizar primero un análisis de dimensiones, las cuales se presentan de la siguiente manera.

El área de cada pieza:

$$110 \text{ mm} * 35 \text{ mm} = 3850 \text{ mm}^2 \quad 1$$

Volumen para cada pieza

$$3850 \text{ mm}^2 * 1 \text{ mm} = 3850 \text{ mm}^3 = 3.85 \text{ cm}^3 \quad 2$$

Volumen total para ambas piezas:

$$3850 \text{ mm}^3 * 2 = 7700 \text{ mm}^3 = 7.7 \text{ cm}^3 \quad 3$$

Una vez obtenido este dato se tiene que considerar la densidad el material seleccionado. En este caso el acero P20, tiene una densidad de 7.85 g/cm^3 [57].

$$7.7 \text{ cm}^3 * 7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 60.445 \text{ g} \quad 4$$

Con base en el análisis anterior, el costo total del material requerido para ambas piezas es de aproximadamente 10,735 colones. Este valor ha sido calculado considerando el volumen de las piezas, su densidad y el precio actual del acero P20, el cual ha sido adquirido en Suminox Aceros (Costa Rica), una fuente local que ofrece este material con las especificaciones requeridas para este proyecto.

4.6.2. Costos fijos y variables

En la evaluación de los costos asociados a la fabricación del molde, es fundamental dividir los gastos en costos fijos y costos variables para tener una mejor comprensión del impacto económico del proyecto. Los costos fijos corresponden a aquellos que no varían con la producción y representan una inversión inicial necesaria para el funcionamiento del molde.

Entre ellos se incluyen la máquina de inyección portátil, cuyo precio oscila entre 1.000.000 y 2.000.000 colones, dependiendo del proveedor. De igual modo, se requiere de una prensa tipo C de 25 mm, la cual tiene un costo de entre 1.000 y 2.000 colones. Finalmente, se debe de contemplar la adquisición del acero P20, cuyo precio, según el valor obtenido en la sección anterior, es de 10.735 colones.

Por otro lado, los costos variables están directamente relacionados con el volumen de producción y fluctúan de acuerdo con la cantidad de unidades fabricadas o los recursos consumidos. Debido a esto, no se puede realizar un análisis económico exacto de cada uno de los aspectos. En este proyecto, los costos variables incluyen el consumo de electricidad durante los ciclos de inyección, la cantidad de Ecovio y de rastrojo de piña. Además, se consideran costos variables los gastos en mano de obra y mantenimiento del molde, así como los costos relacionados con el maquinado.

Con el fin de visualizar un poco más el costo aproximado del consumo de electricidad se utilizará una máquina de inyección de 340 W (0.34 kWh).

$$\text{Ciclos por hora} = \frac{3600 \text{ segundos por hora}}{18.7 \text{ segundos por ciclo}} = 192 \text{ ciclos por hora} \quad 5$$

$$\text{Consumo de energía por ciclo} = \frac{0.34 \text{ kWh}}{192 \text{ ciclos}} = 0.0018 \text{ kWh por ciclo} \quad 6$$

Una vez que ya tenemos valor de consumo de energía por ciclo, procedemos a ver cuál es el costo por kWh de la zona en la cual se va a desarrollar, y así realizamos el cálculo de consumo. Por ejemplo, si el proceso de inyección se realiza en Cartago, la compañía a cargo del suministro eléctrico es JASEC, mientras que en San José la empresa responsable es la Compañía Nacional de Fuerza y luz (CNFL). Ambas compañías ofrecen tarifas variables según la cantidad de kWh consumidos. En el caso de JASEC, tendría un valor por kWh de

¢75,80 para consumos de 31 a 200 kWh y de ¢92,79 para consumos mayores a 200 kWh [58]. En CNFL, el valor por kWh sería de ¢71,28 para consumos de 31 a 200 kWh, ¢109,39 para consumos de 201 a 300 kWh y ¢113,09 para consumos mayores a 300 kWh [59].

Para consumos menores a 30 kWh, ambas compañías aplican un cargo fijo mensual: en JASEC, el cargo fijo es de ¢2.274.00, mientras que en CNFL es de ¢2.138.40. Dado que el consumo por ciclo es de 0,0018 kWh, si el consumo total mensual se mantiene por debajo de 30 kWh, se aplicará únicamente el cargo fijo correspondiente. Para consumos que superen los 30 kWh mensuales, se aplican tarifas adicionales por kWh según el consumo generado.

Por otro lado, la cantidad de gramos de Ecovio necesarios para el proceso de fabricación dependerá directamente del volumen de producción planificado, sin embargo, con el fin de obtener un valor más exacto se calculará la cantidad requerida por ciclo. El volumen total de Ecovio necesario por ciclo es de aproximadamente 11.52 cm³, lo cual permitirá estimar la cantidad de gramos requeridos, como se detalla a continuación:

$$11.52 \text{ cm}^3 \times \frac{1.47 \text{ gramos}}{1 \text{ cm}^3} = 16.93 \text{ gramos} \quad 3$$

El precio del Ecovio puede variar considerablemente según el proveedor y el mercado, en esta ocasión, BASF ha establecido que el precio es de 350 €/ton en Europa. El precio final estimado de Ecovio importado a Costa Rica, incluyendo IVA y gastos de importación, este precio sería aproximadamente de ¢0.252 por gramo. Este valor considera un tipo de cambio de 595 colones por euro y un recargo de 13% de IVA más un 8% por gastos de importación. Para un ciclo de producción que requiere 16.93 gramos de Ecovio, el costo total sería de aproximadamente **¢4.27 por ciclo**.

En el caso del rastrojo de piña, su valor no interfiere debido a que al ser un desecho no tiene valor agregado en su estado original, sin embargo, si existe un costo al momento de procesarla. Este proceso se realiza por medio de una desfibradora mecánica, seguido de un secado que permite reducir su humedad y mejorar sus propiedades.

La mano de obra para la operación del molde estará en función del número de horas en las que la máquina de inyección esté en funcionamiento. En cuanto al mantenimiento del molde, este debe planificarse según la frecuencia de uso y el desgaste que experimenten las

piezas durante la producción. Finalmente, el costo del maquinado del molde dependerá de los métodos y técnicas seleccionadas; este molde puede ser fabricado mediante procesos como el fresado, el uso de electrodos de tamaños específicos, la electroerosión por penetración, el torneado, entre otros. Asimismo, se pueden explorar alternativas que optimicen el proceso de fabricación para asegurar precisión y eficiencia en los costos.

Tabla 6. Tabla resumen de costos fijos y variables [Elaboración propia].

| Tipo de costo | Aspecto evaluado | Descripción | Costo aproximado |
|----------------|-------------------------------|---|---|
| Costo fijo | Máquina de inyección portátil | Costo según proveedor | ¢1,000,000 - ¢2,000,000 |
| | Prensa tipo C de 25 mm | Costo según proveedor | ¢1,000 - ¢2,000 |
| | Acero P20 | Material para la fabricación del molde | ¢10,735 |
| Costo variable | Consumo eléctrico | Tarifa eléctrica (JASEC) Tarifa eléctrica (CNFL) | ¢75.80 / ¢92.79 por kWh ¢71.28 / ¢109.39 / ¢113.09 por kWh |
| | Precio del Ecovio | Importación y gastos adicionales (BASF) | ¢0.252 por gramo |
| | Rastrojo de piña | Procesamiento mediante desfibradora mecánica y secado | ¢2,000-¢3,000 |
| | Mano de obra | Basado en horas de operación | Variable |
| | Mantenimiento del molde | Según la frecuencia de uso y desgaste | Variable |
| | Maquinado del molde | Fresado, electroerosión, torneado, otros. | Variable |

4.7. Impacto de la implementación y viabilidad

Según la información obtenida en la sección anterior, este proyecto representa una opción económicamente viable y con un gran potencial en el mercado. Al tratarse de productos pequeños, como las plastiflechas, la materia prima utilizada es sumamente eficiente, permitiendo un rendimiento considerable, esto, sumado a la posibilidad de producción en masa cuando el proceso es continuo, convierte al moldeo por inyección en una técnica eficaz para fabricar grandes volúmenes con precisión y calidad constante en cada pieza. Aunque la inversión inicial de la máquina de moldeo por inyección es elevada, esta tecnología proporciona beneficios significativos a largo plazo, logrando excelentes acabados.

El costo de los materiales, en particular el acero P20 y el biopolímero Ecovio, es accesible dentro del marco de este proyecto; sin embargo, el proceso de maquinado de las partes pequeñas puede ser tedioso, requiriendo técnicas precisas y detalladas que aseguren la calidad en cada unidad. En resumen, la implementación de este proyecto no solo es viable desde el punto de vista económico, sino que también abre puertas para innovaciones sostenibles en el mercado de los biopolímeros, generando beneficios tanto financieros como sociales, y garantizando una producción eficiente y rentable en el mediano y largo plazo.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir del análisis de los resultados alcanzados en este proyecto.

5.1. Conclusiones

1. El desarrollo de plastiflechas biodegradables utilizando biopolímeros y derivados de residuos agrícolas es una alternativa efectiva para reducir la contaminación plástica en la industria agrícola.
2. La implementación de plastiflechas biodegradables en el etiquetado agrícola representa un avance significativo en prácticas sostenibles dentro del sector.
3. Mediante una revisión exhaustiva de fichas técnicas y bibliografía se establecieron parámetros específicos para el uso del software Moldex3D, obteniendo así datos aproximados para el proceso de fabricación. A través de simulaciones computacionales, se determinó que el Prototipo 1 resultó ser el más eficiente debido a su geometría y capacidad de llenado.
4. Entre los biopolímeros evaluados, el PLA y el Ecovio arrojaron los resultados más favorables, siendo el Ecovio el seleccionado por sus superiores propiedades de biodegradación. La elección del Ecovio, es validada mediante simulaciones y prototipado, asegura un rendimiento óptimo, durabilidad y cumplimiento con los estándares de biodegradabilidad requeridos para la exportación.
5. El molde fue diseñado específicamente para una máquina de moldeo por inyección de escritorio, lo cual ofrece una opción versátil, portátil y fácil de usar. La selección de esta técnica y el material del molde se realizó considerando su eficiencia y facilidad de implementación en los entornos de producción.
6. El proyecto cumple con regulaciones internacionales en biodegradabilidad y compostabilidad, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).
7. La viabilidad del proyecto destaca por sus beneficios económicos. La inversión en maquinaria se podría recuperar mediante una producción en masa eficiente,

aprovechando el bajo costo de materiales y la efectividad en cada ciclo de moldeo para asegurar una sólida rentabilidad.

8. El proyecto promueve la sostenibilidad ambiental y fomenta la generación de empleo, consolidándose como una alternativa económicamente viable y socialmente responsable.

5.2. Recomendaciones

1. Realizar estudios adicionales para optimizar los parámetros de moldeo, como la temperatura de inyección, presión de compactación y tiempos de enfriamiento, con el fin de mejorar la calidad de las plastiflechas biodegradables y reducir el tiempo del ciclo de producción.
2. Investigar y probar nuevos biopolímeros que presenten propiedades avanzadas de biodegradabilidad y rendimiento mecánico. Esto permitiría explorar opciones de materiales más rentables o con mejores características para aplicaciones futuras.
3. Evaluar el diseño del molde, se pueden realizar ajustes en el espaciado que existe entre las cavidades para facilitar el maquinado de los detalles de las plastiflechas. Además, se puede considerar la inclusión de cavidades adicionales en el molde, lo que permitiría aumentar la producción y adaptarse a volúmenes más altos en condiciones de producción industrial.
4. Explorar diseños alternativos del molde que faciliten un desmoldeo más rápido y reduzcan el desgaste del mismo, con el objetivo de mejorar su durabilidad y reducir costos a largo plazo.

Referencias bibliográficas

- [1] Asamblea Legislativa de Costa Rica., "Ley para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente."
- [2] E. Baeza G. and Vivanco F. Enrique, "Regulaciones europeas en materia de entrega de plásticos y otros productos de un solo uso,".
- [3] (Organización de las Naciones Unidas and ONU), "Objetivos y metas de desarrollo sostenible,".
- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Breaking the plastic cycle in agriculture,".
- [5] L. Gil, "Costa Rica prepara el terreno para una agricultura climáticamente inteligente," vol. 2024, no. Sep 13, -12-07T17:30+01:00.
- [6] UN GLOBAL COMPACT, "Sostenibilidad: la única apuesta por el futuro | Pacto Mundial ONU,".
- [7] Servicio de Investigación del Parlamento Europeo, "Economía circular: definición, importancia y beneficios," vol. 2024, no. Aug 03, -05-24.
- [8] ONU, "Cómo reducir el impacto de los plásticos de un solo uso," vol. 2024, no. Aug 11, Tue, 11/23/ - 10:54.
- [9] La Comisión Económica para América Latina, (CEPAL), "Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)," vol. 2024, no. Aug 03.
- [10] M. Fernando Valero-Valdivieso, Y. Ortegón and Y. Uscategui, "BIOPOLÍMEROS: AVANCES Y PERSPECTIVAS BIOPOLYMERS: PROGRESS AND PROSPECTS,".
- [11] E. Rodríguez-Alba, A.E. Bernal Dubón, H.E. Gaitán López, C.A.K. Godoy, J.B. Salguero Mérida, E.M. Toledo Hernández, C.L. Vásquez Maldonado and A. Martínez-Richa, "La Ciencia de los Polímeros Biodegradables,".
- [12] L. Shen, J. Haufe, and M. Patel, "Product overview and market projection of emerging bio-based plastics,".
- [13] A. George, M.R. Sanjay, R. Srisuk, J. Parameswaranpillai and S. Siengchin, "A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites," *Int.J.Biol.Macromol.*, vol. 154, pp. 329–338.
- [14] S.O. Ebhodaghe and H. Ndibe, "Mechanical Properties of Biopolymers," pp. 253–268.

- [15] BBVA, "Bioplásticos, la alternativa sostenible al plástico convencional," -10-23T12:34:02+02:00.
- [16] MatWeb | Material Property Data, "NatureWorks® Ingeo 3251D injection grade PLA,".
- [17] MatWeb | Material Property Data, "BASF ecovio® IS1335 PLA,".
- [18] MatWeb | Material Property Data, "BASF Ecoflex® C1200 F Blend Biodegradable Polyester,".
- [19] BASF, "Certified compostable biopolymer for injection molding,".
- [20] BASF | We create chemistry, "ecovio® (PBAT, PLA) – Polímero compostable certificado con contenido de base biológica,".
- [21] European Bioplastics, "Market update 2020: Bioplastics continue to become mainstream as the global bioplastics market is set to grow by 36 percent over the next 5 years," -12-02T10:25:45+02:00.
- [22] M. Groover, "Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems," ed. Fourth edition, 2010.
- [23] MARVIC DESMANCHADORES, "PLASTIFLECHA,".
- [24] S. Kalpakjian and S. Schmid, "Manufacturing Engineering and Technology," 2014.
- [25] Siemens Digital Industries Software, "Diseño asistido por ordenador (CAD) | Siemens Software," vol. 2024, no. Aug 11.
- [26] Solidworks, "Compresión del movimiento en la simulación ,".
- [27] R. Shell and E. Hall, "Handbook Of Industrial Automation," 2000.
- [28] D.V. Rosato and M.G. Rosato, "Injection molding handbook," 2012.
- [29] C.W. Peterson, G. Ehnert, R. Liebold, K. Hörsting and R. Kühfusz, "Compression Molding," vol. 21, pp. 0.
- [30] J.A. Brydson, "Plastics Materials," 1999.
- [31] R. Malloy A., "Plastic Part Design for Injection Molding:An Introduction ,".
- [32] Topworks Plastic Molding, "Proceso de moldeo por inyección," vol. 2024, no. Nov 13, -12-23T13:28:49+08:00.
- [33] AJ Solutions | Power in plastics, "Holipress, the manual plastic injection," vol. 2024, no. Oct 13.

- [34] J. Vlachopoulos and D. Strutt, "Polymer processing," *Materials Science and Technology*, vol. 19, no. 9, pp. 1161–1169.
- [35] PSDVISION | TAKE CONTROL, "Moldex3D | Plastic injection molding,".
- [36] F. González-Arancibia, M. Mamani, C. Valdés, C. Contreras-Matté, E. Pérez, J. Aguilera, V. Rojas, H. Ramirez-Malule and R. Andler, "Biopolymers as Sustainable and Active Packaging Materials: Fundamentals and Mechanisms of Antifungal Activities," *Biomolecules*, vol. 14, no. 10.
- [37] O.K. Cakmak, "Biodegradable Polymers—a Review on Properties, Processing, and Degradation Mechanism," *Circular Economy and Sustainability*, vol. 4, no. 1, pp. 339–362.
- [38] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste | European Parliament and Council," -12-20.
- [39] European Commission, "REACH Regulation," , vol. 2024, no. Aug 05, -07-30.
- [40] H. Kumamaru and K. Takeuchi, "The Recycled Content of Plastic Products: Estimating the Impact of Japan's Container and Packaging Recycling Law,".
- [41] US EPA, "Toxic Substances Control Act (TSCA) and Federal Facilities," , vol. 2024, no. Aug 05, -09-19T11:40:03-04:00.
- [42] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives," , -11-19.
- [43] Asociación Española de Normalización y Certificación, "UNE-EN 13432:2001 Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje.".
- [44] ASTM 6400-23, "Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities,".
- [45] BPI, "Commercial Compostability Certification," , vol. 2024, no. Aug 5.
- [46] N. Döhler, C. Wellenreuther and A. Wolf, "Market dynamics of biodegradable bio-based plastics: Projections and linkages to European policies," *EFB Bioeconomy Journal*, vol. 2, pp. 100028.
- [47] European Commission, "Plastics in a circular economy," , vol. 2024, no. Aug 12, -03-04.

- [48] K. Jacob, R. Quitzow and H. Baer, "Green Jobs: Impacts of a Green Economy on Employment," 2015.
- [49] BASF, "Ecoflex ® F Blend C1200,".
- [50] I. Elfaleh, F. Abbassi, M. Habibi, F. Ahmad, M. Guedri, M. Nasri and C. Garnier, "A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials," *Results in Engineering*, vol. 19, pp. 101271.
- [51] R.M.N. Arib, S.M. Sapuan, M.M.H.M. Ahmad, M.T. Paridah and H.M.D.K. Zaman, "Mechanical properties of pineapple leaf fibre reinforced polypropylene composites," *Mater Des*, vol. 27, no. 5, pp. 391–396.
- [52] M. Czepiel, M. Bańkosz and A. Sobczak-Kupiec, "Advanced Injection Molding Methods: Review," *Materials*, vol. 16, no. 17.
- [53] Formlabs, "Guide to Compression Molding From Prototyping to Mass Production," vol. 2024, no. Oct 22.
- [54] M. Texen, "How to Choose the Best Materials for Durable Mold Making," vol. 2024, no. Oct 23.
- [55] H. Gastrow, "Moldes de inyección para plásticos," 1992.
- [56] MatWeb | Material Property Data, "AISI Type P20 Mold Steel (UNS T51620),".
- [57] Anonymous "Tarifas Eléctricas,".
- [58] Compañía Nacional de Fuerza y Luz, "Tarifas Vigentes," vol. 2024, no. Nov 6, -11-04.

ANEXOS

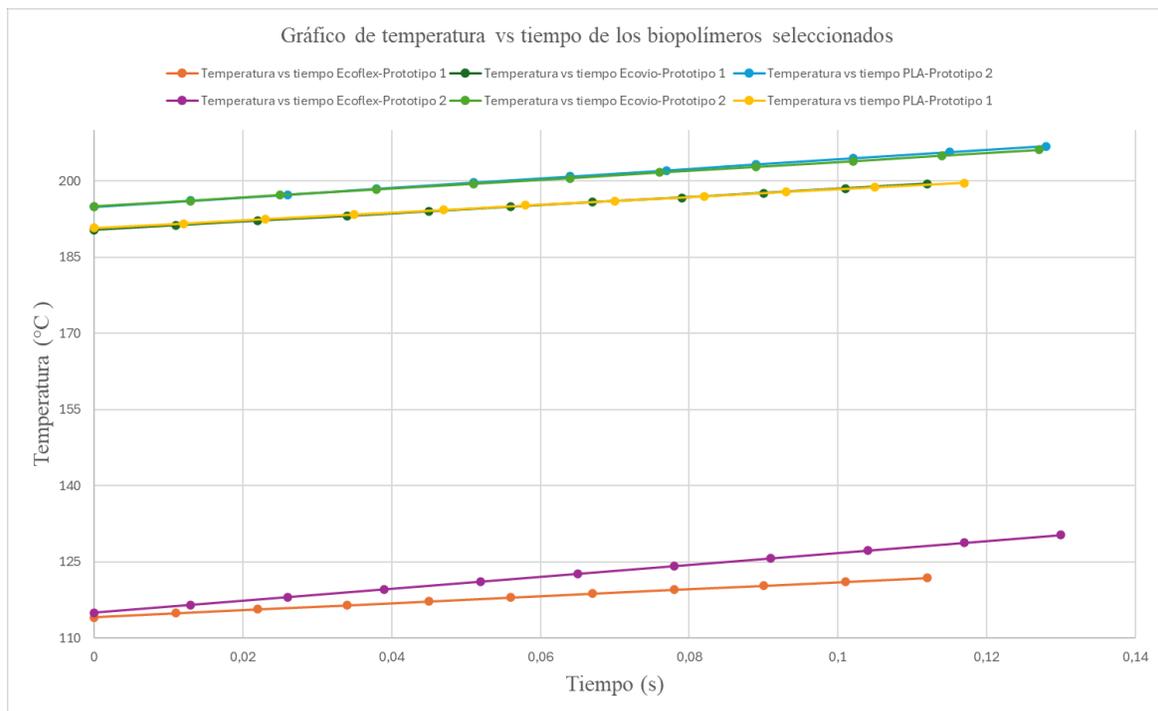
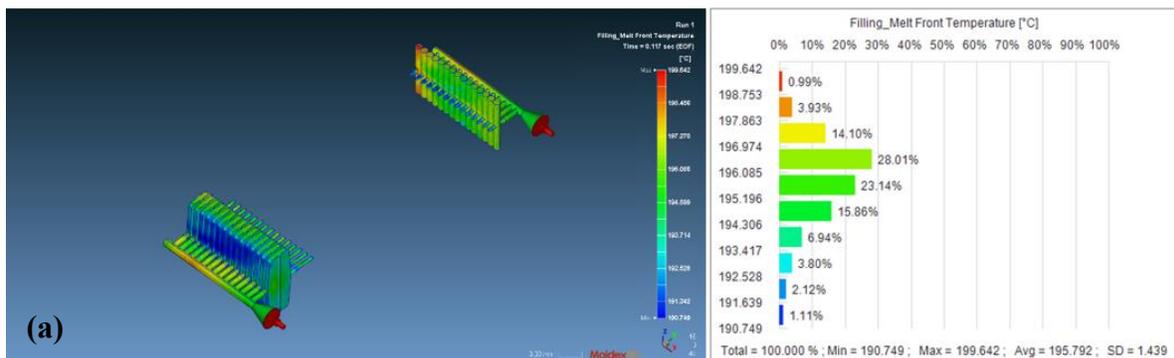


Figura 11. Gráfico de temperatura de llenado vs tiempo de llenado de los biopolímeros seleccionado (PLA, Ecoflex y Ecovio) [Elaboración propia].

Seguidamente se mostrarán las imágenes relacionadas a los resultados de las simulaciones de la **sección 4.3.2**.



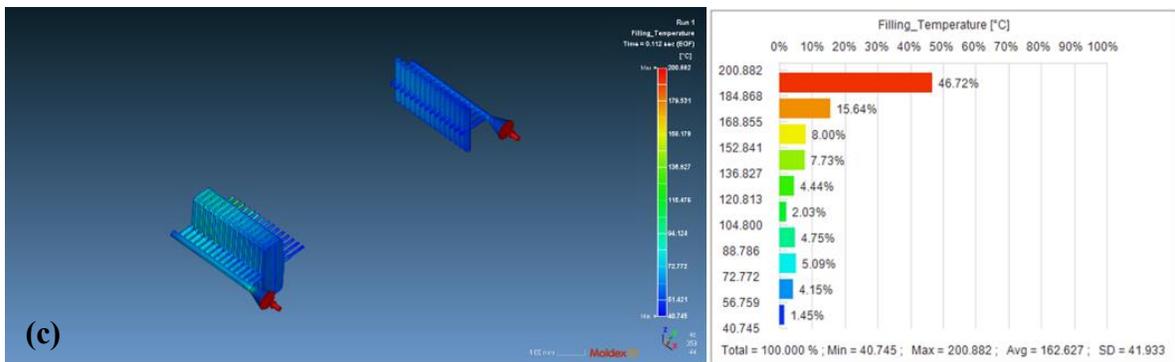
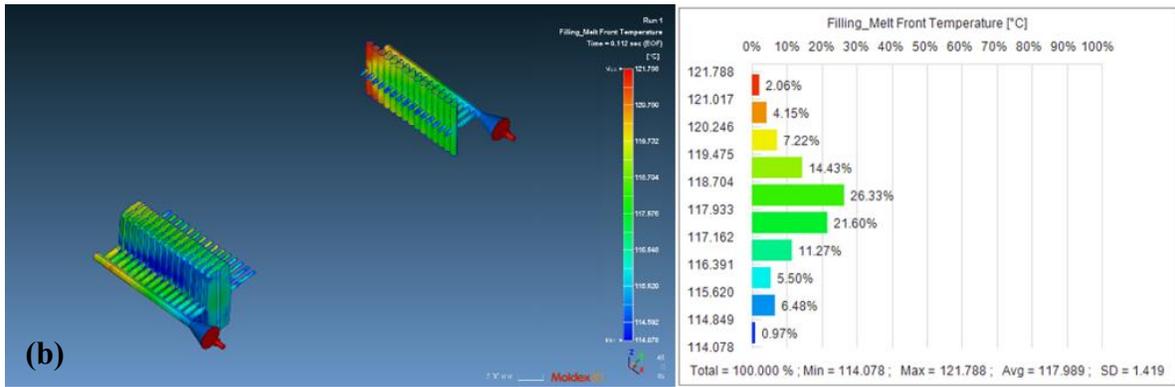
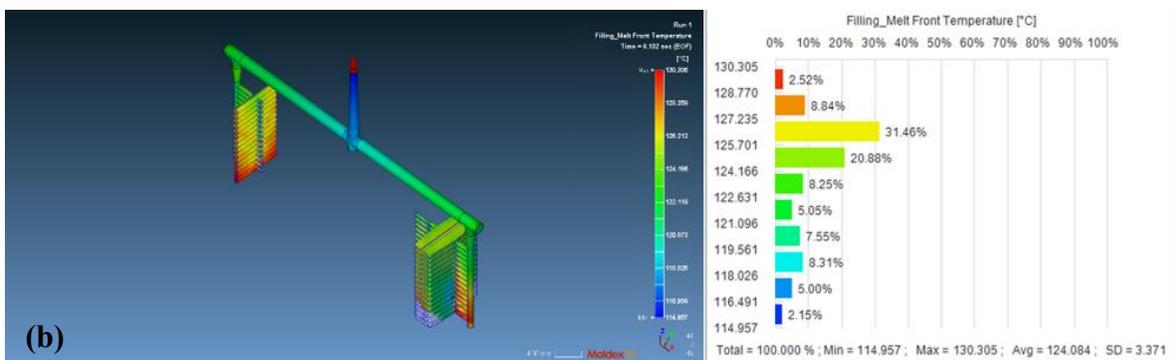
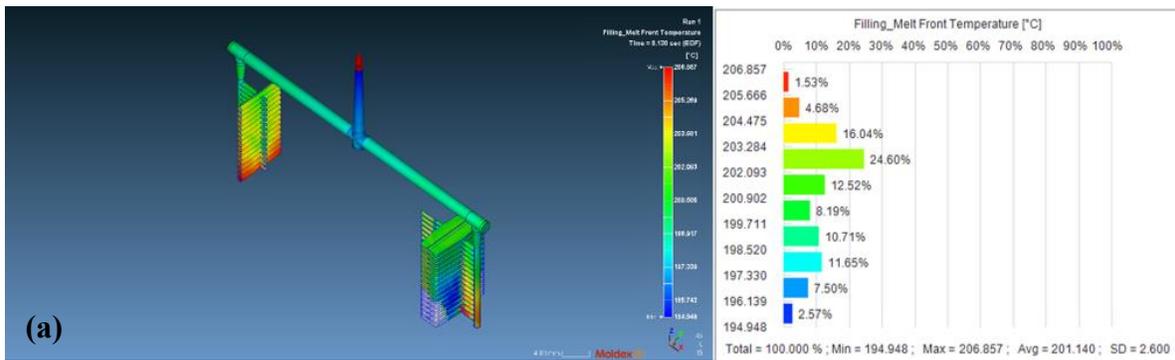


Figura 12. Tiempo y temperatura de llenado del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].



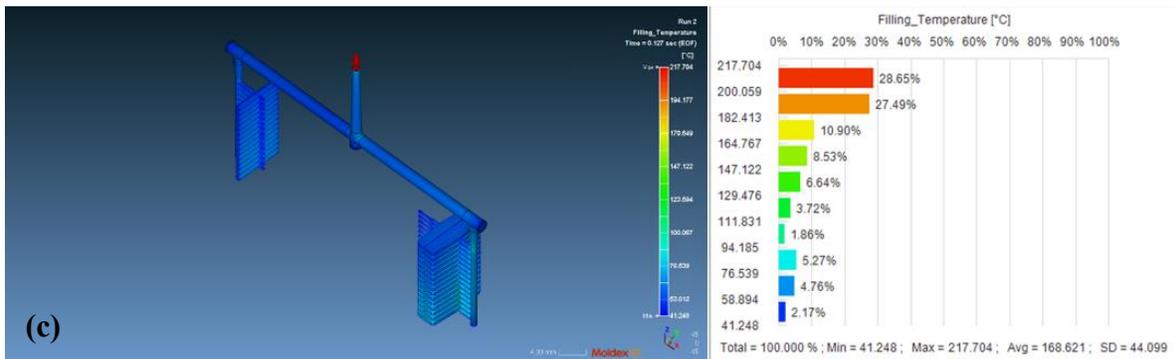


Figura 13. Tiempo y temperatura de llenado del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].

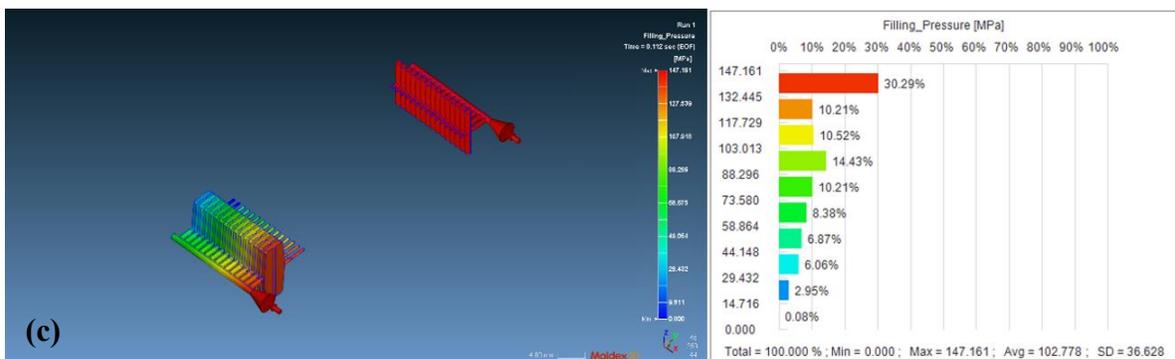
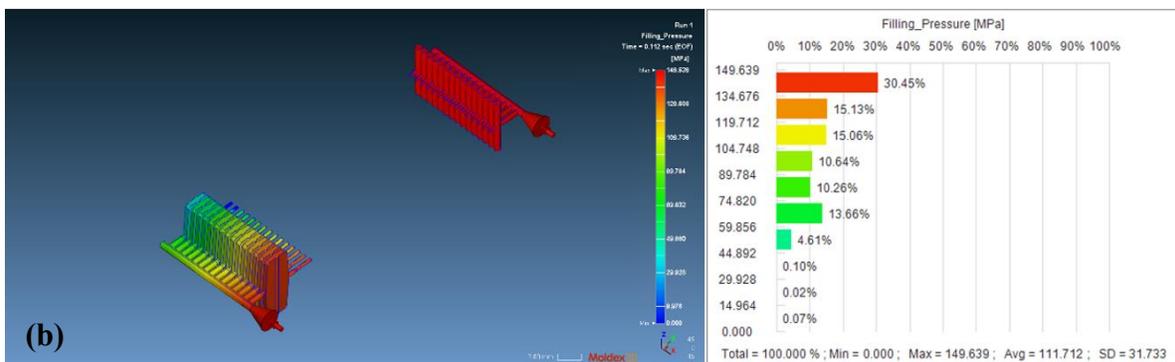
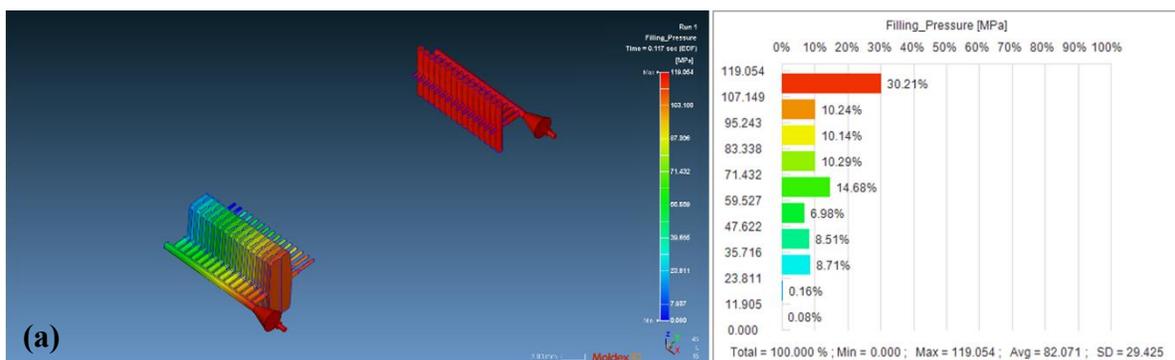


Figura 14. Presión de llenado del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].

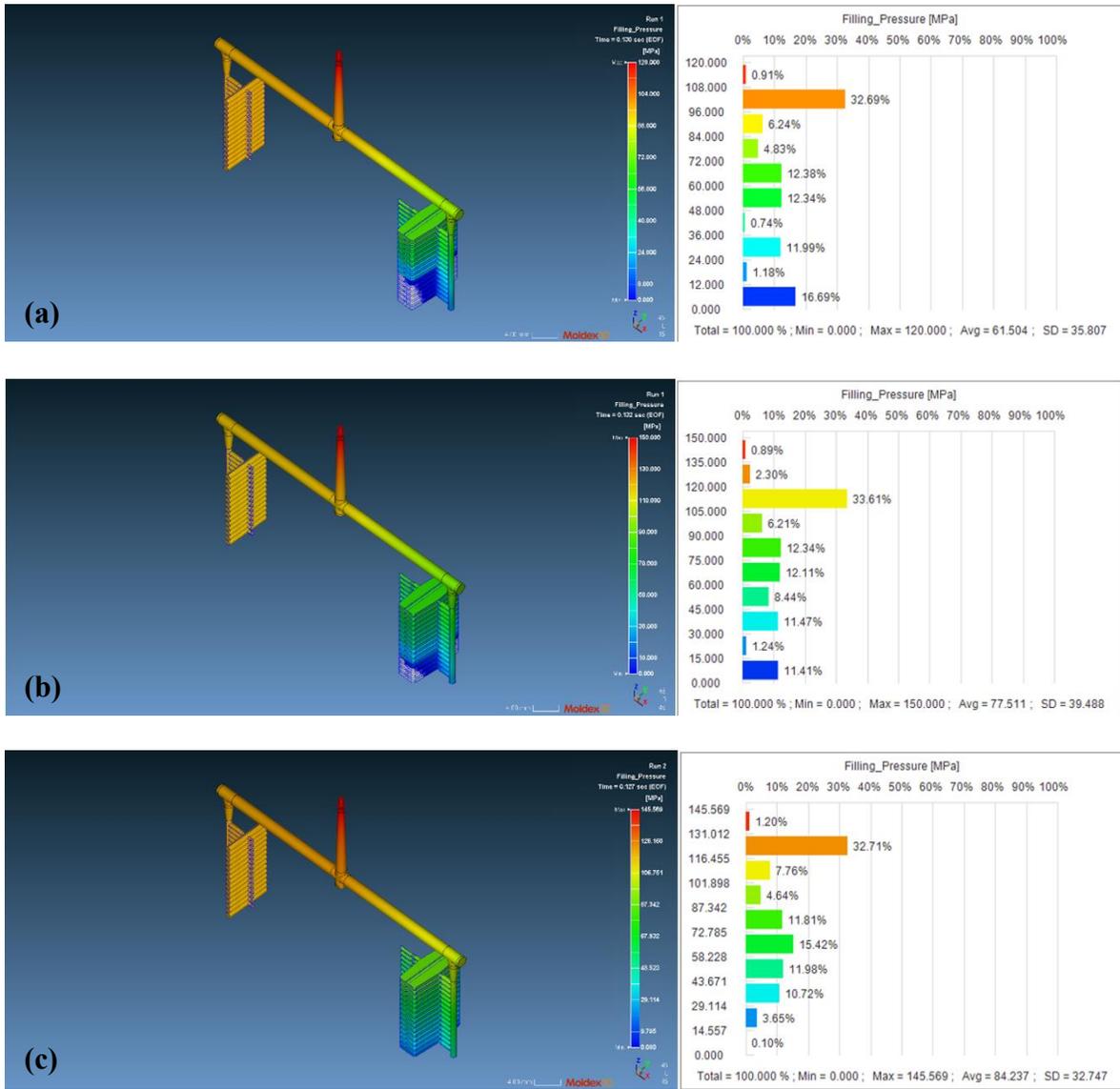
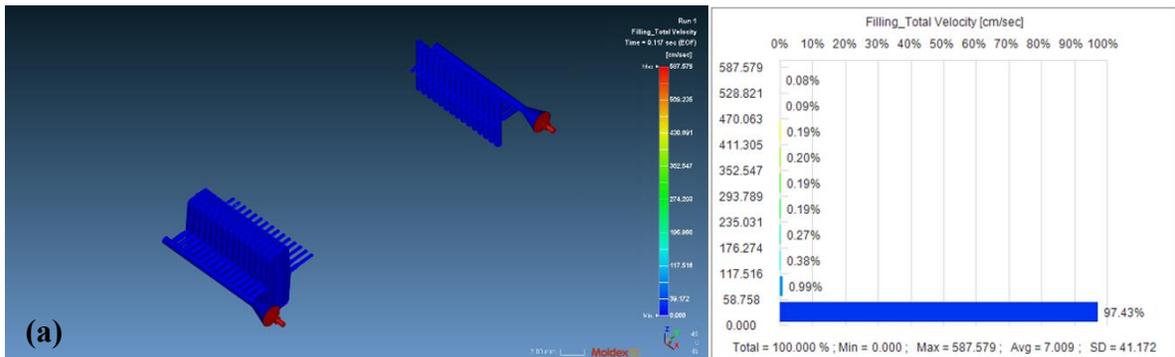


Figura 15. Presión de llenado del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].



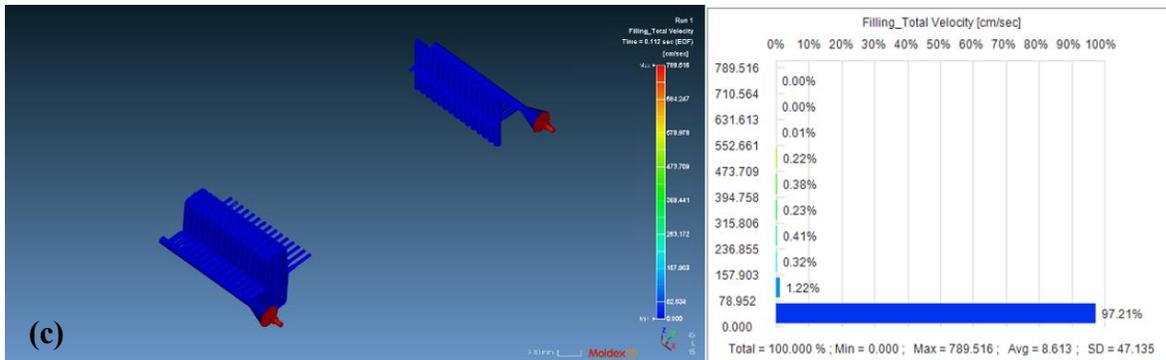
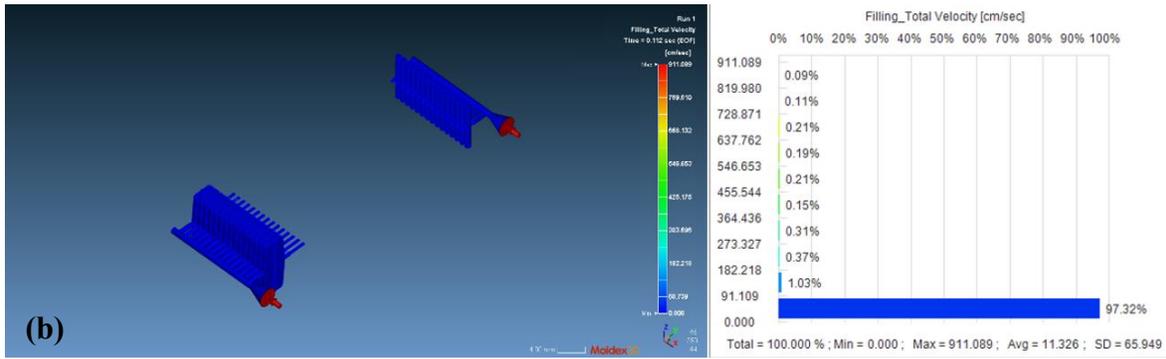
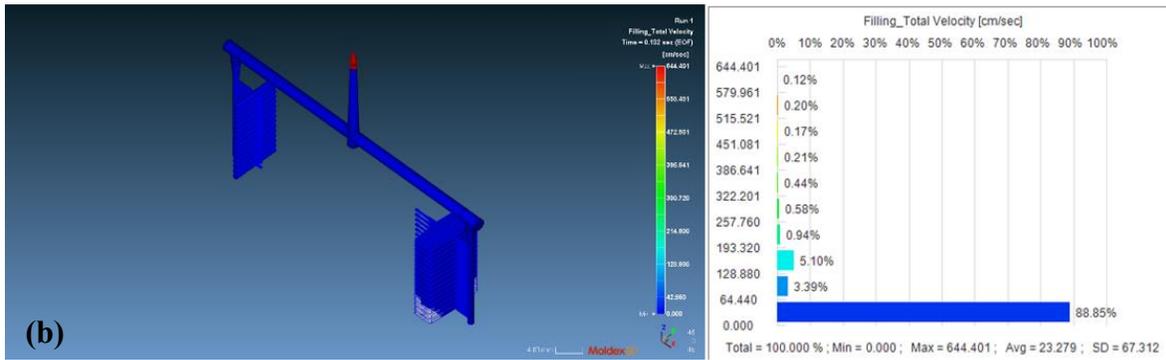
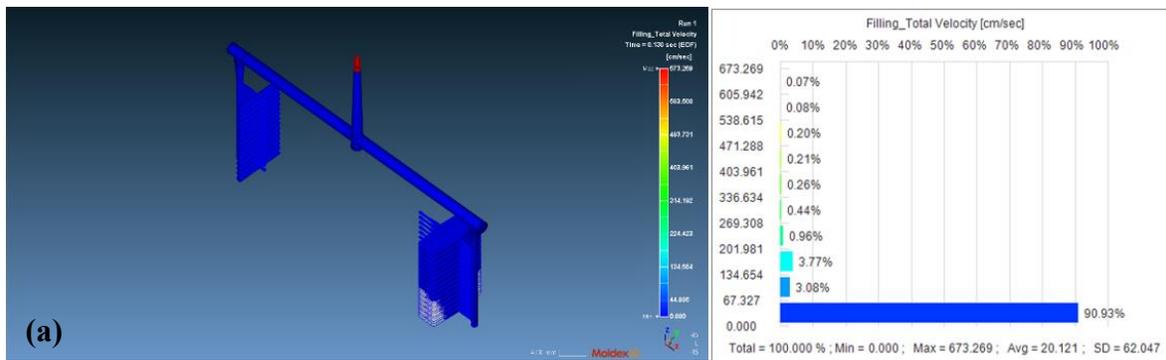


Figura 16. Velocidad de llenado del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecovio (c) Ecoflex [Elaboración propia].



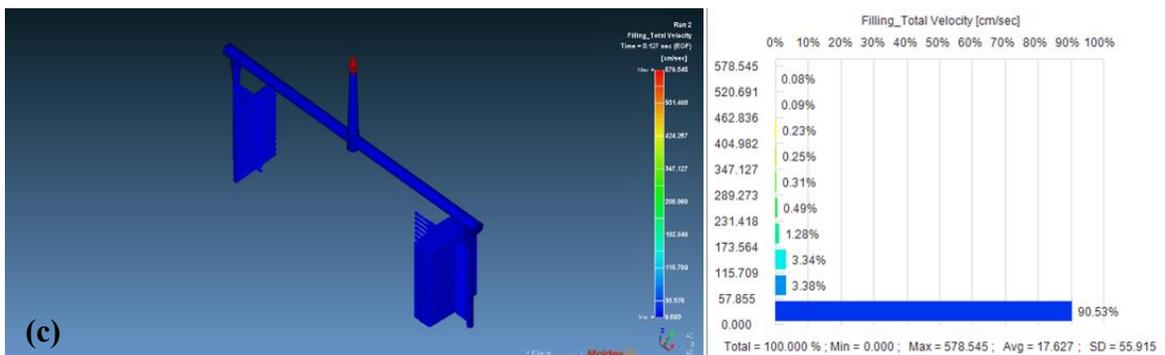


Figura 17. Velocidad de llenado del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].

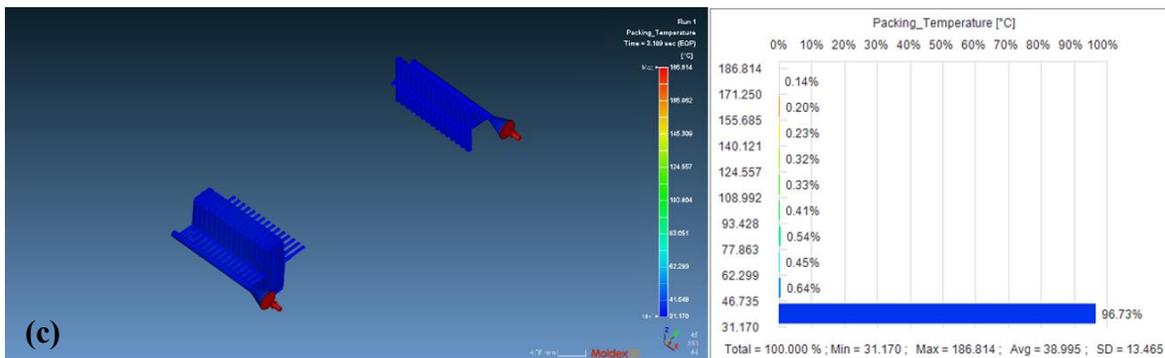
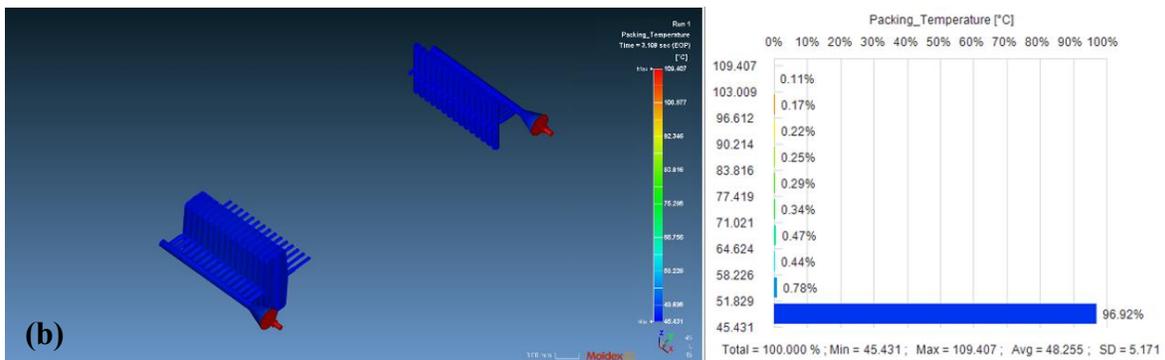
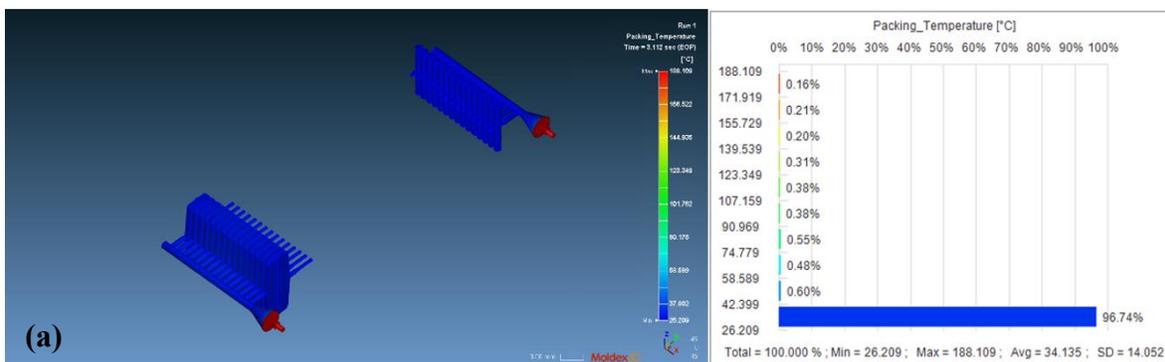


Figura 18. Temperatura de compactación prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].

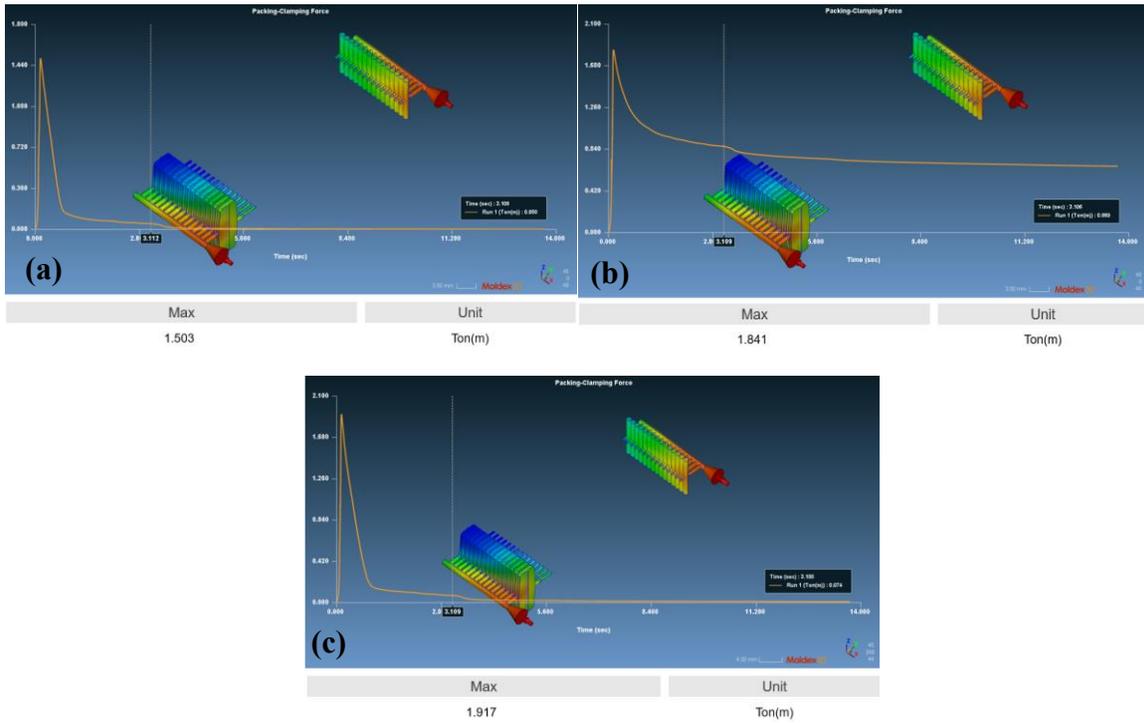
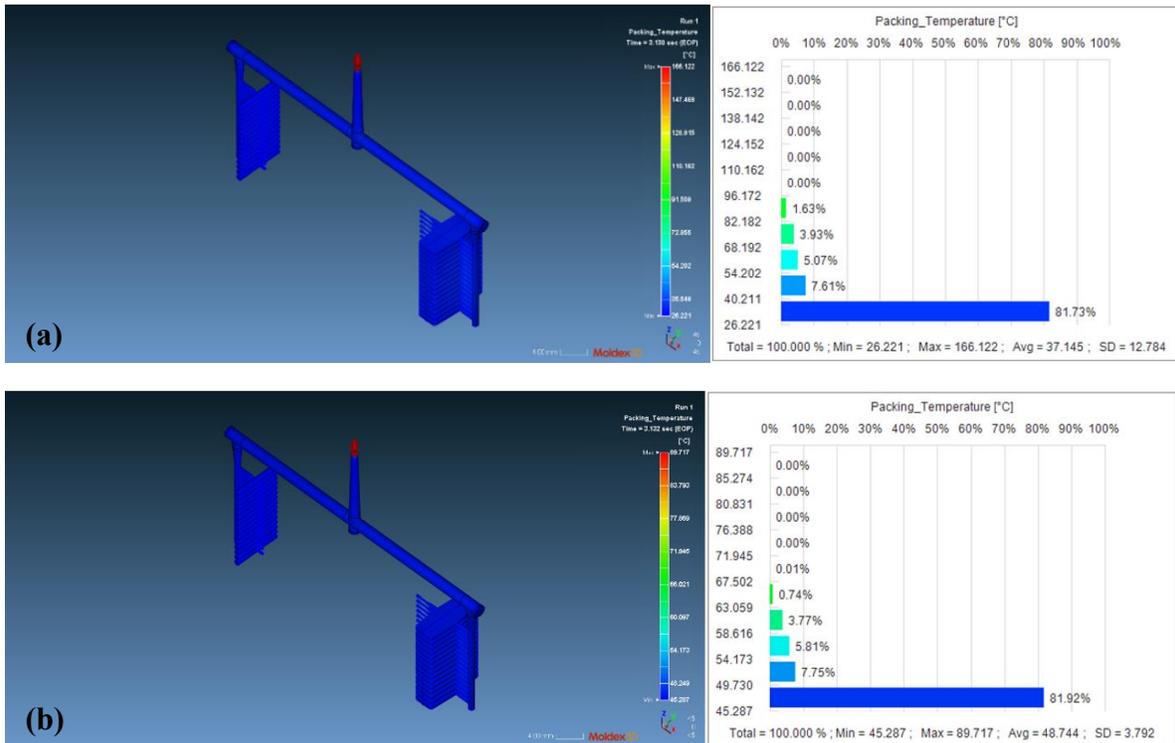


Figura 19. Fuerza de cierre prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].



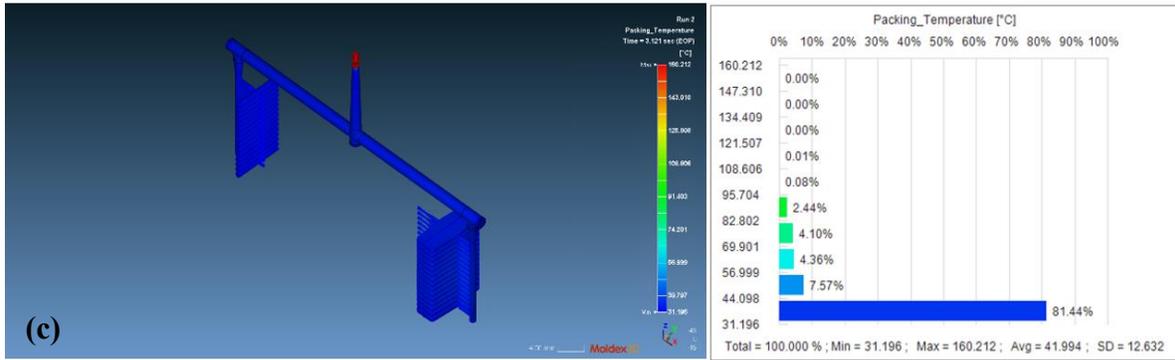


Figura 20. Temperatura de compactación prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].

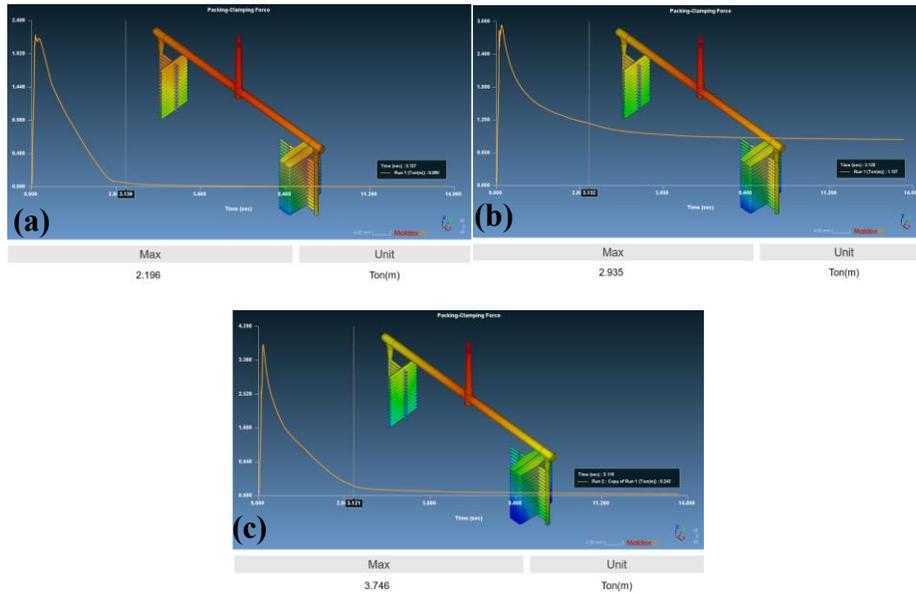
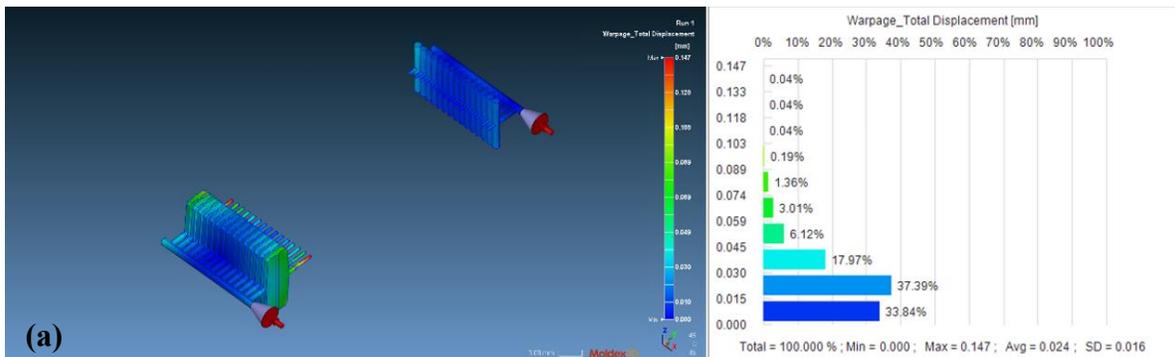


Figura 21. Fuerza de cierre prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].



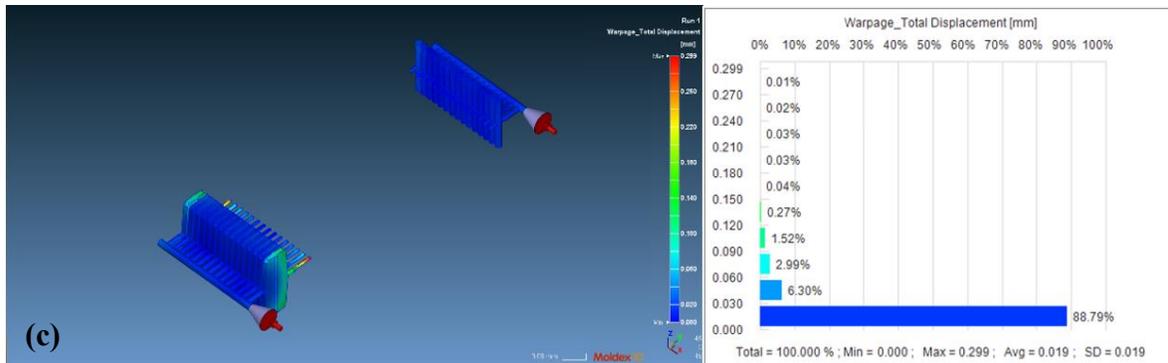
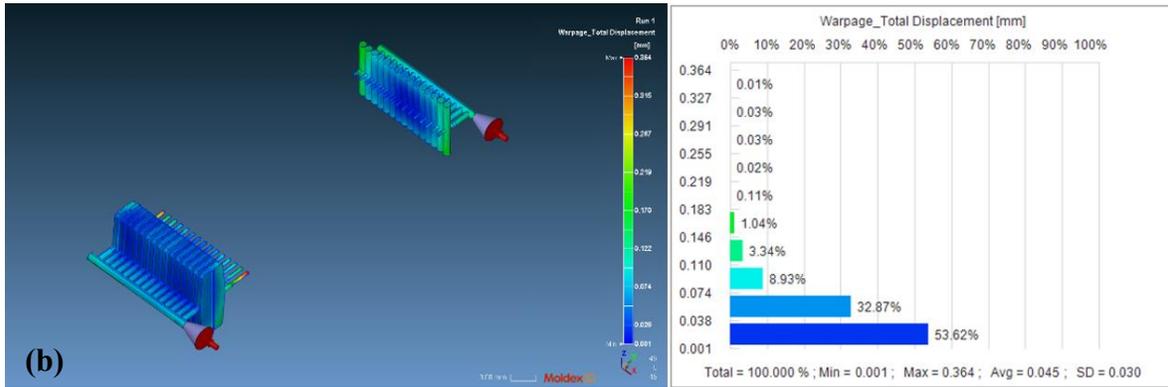
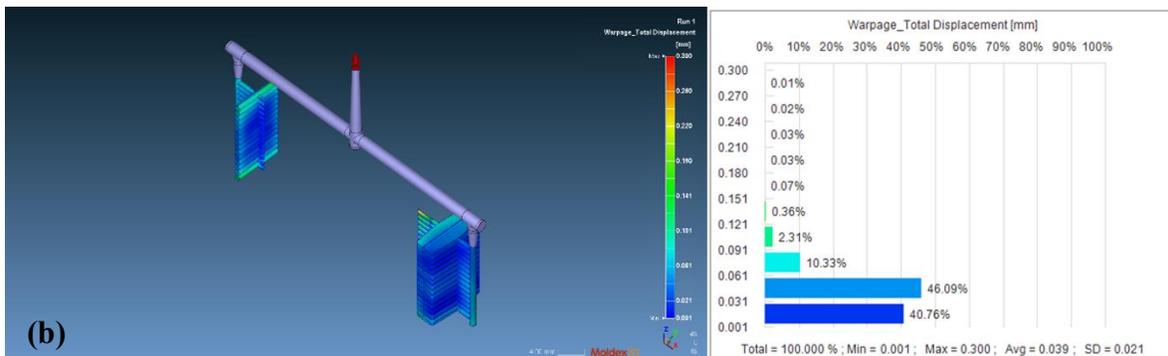
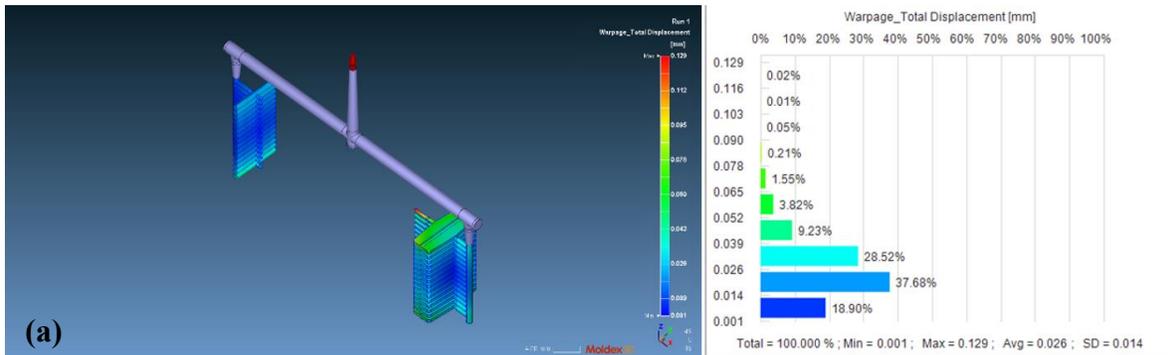


Figura 22. Desplazamiento en los ejes X, Y y Z del prototipo 1 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].



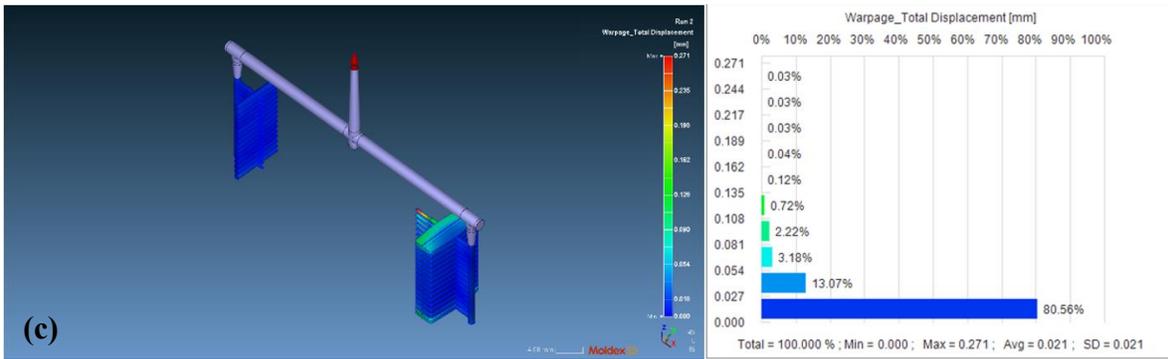
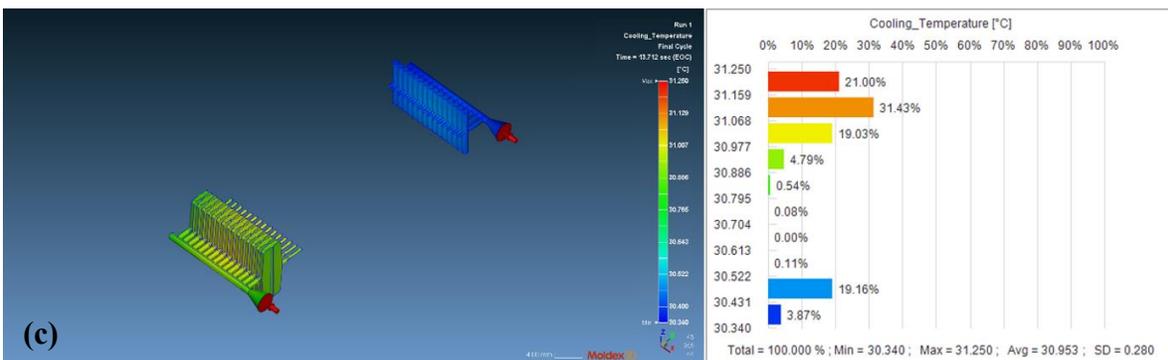
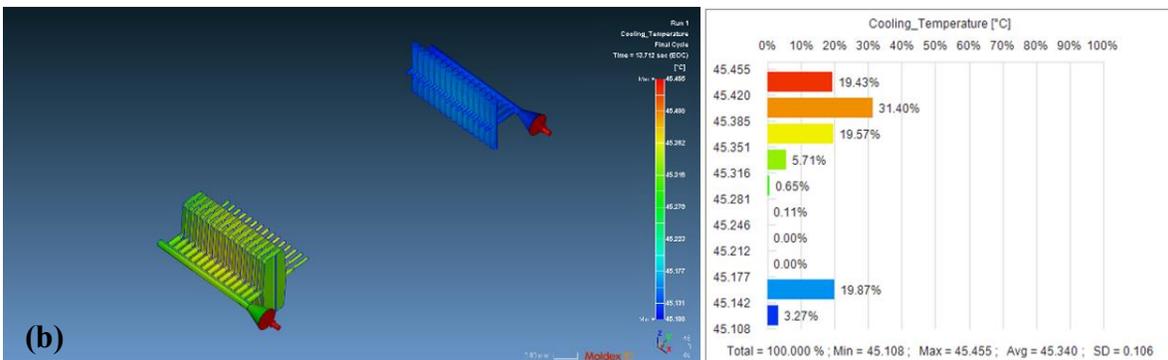
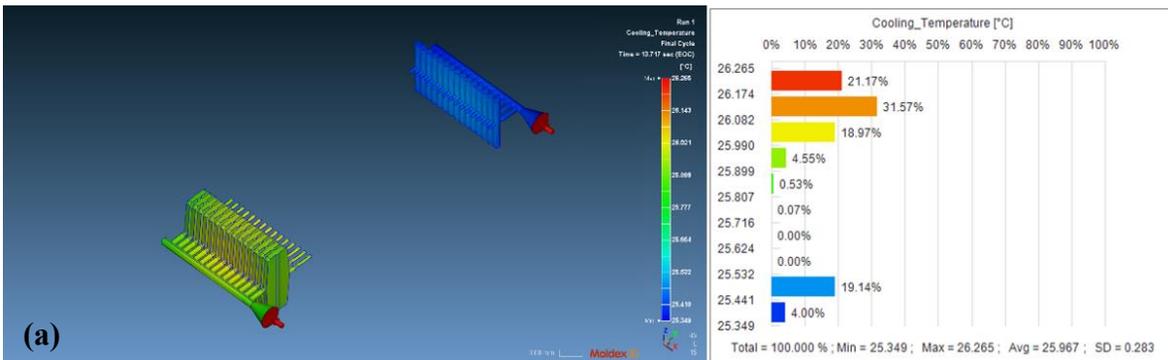


Figura 23. Desplazamiento en los ejes X, Y y Z del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].



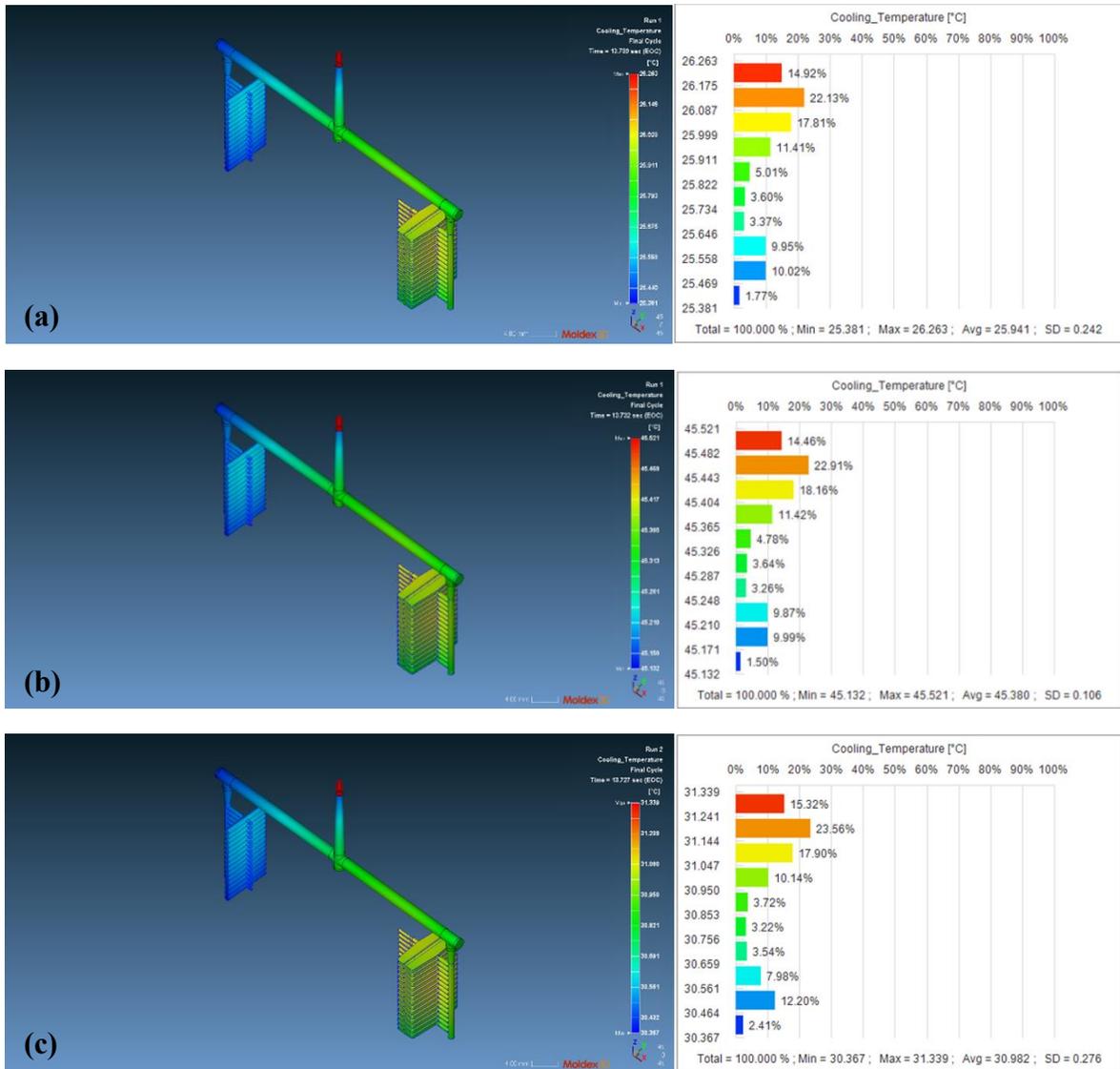
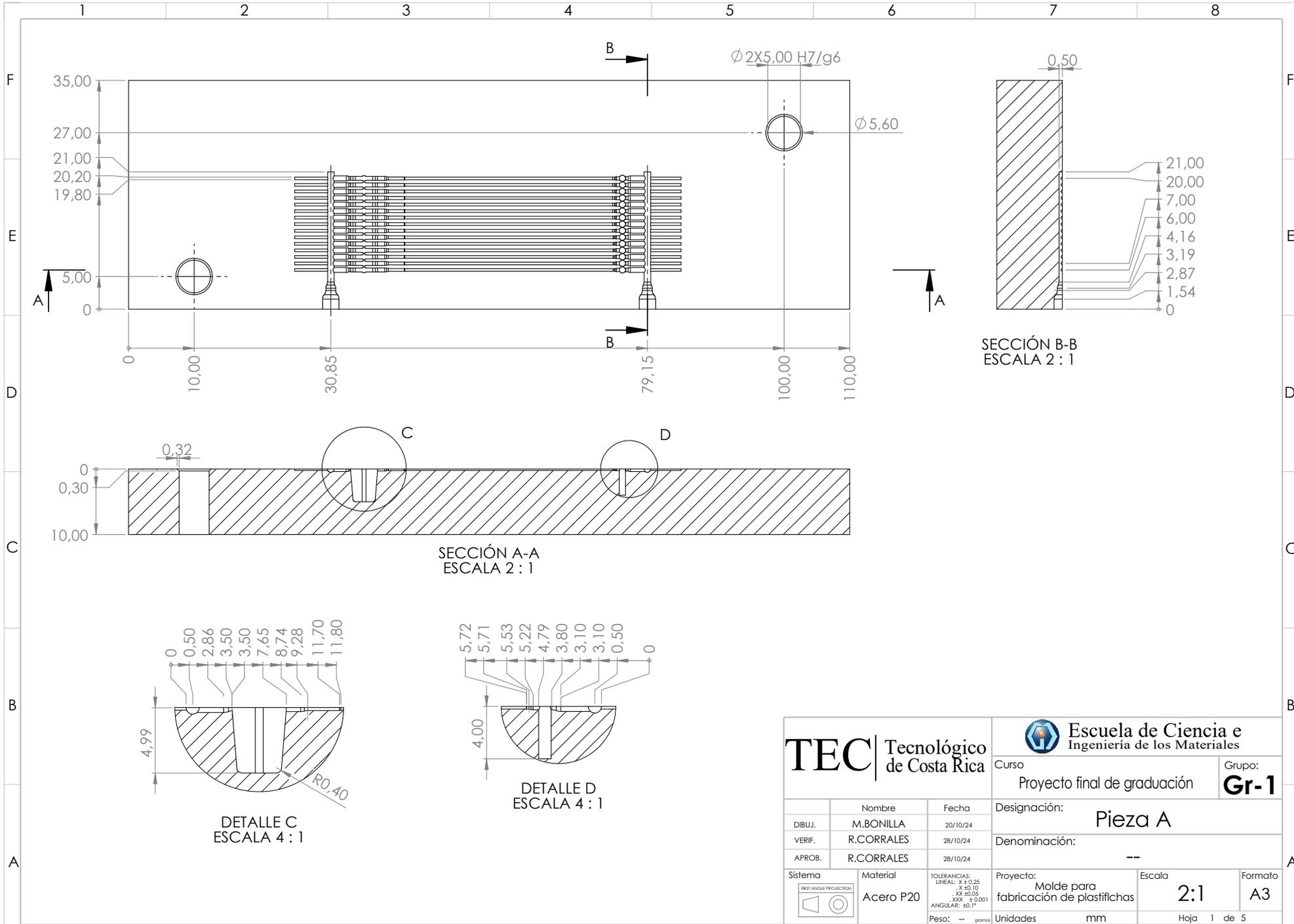
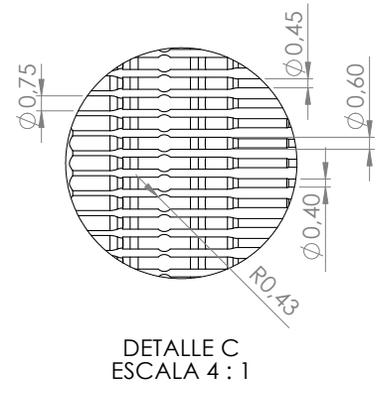
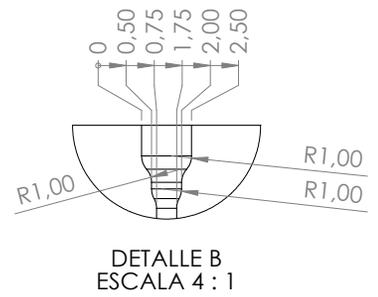
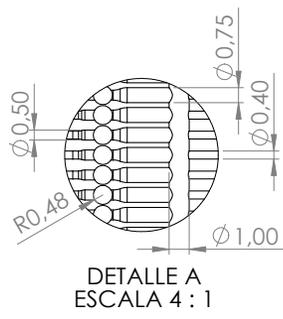
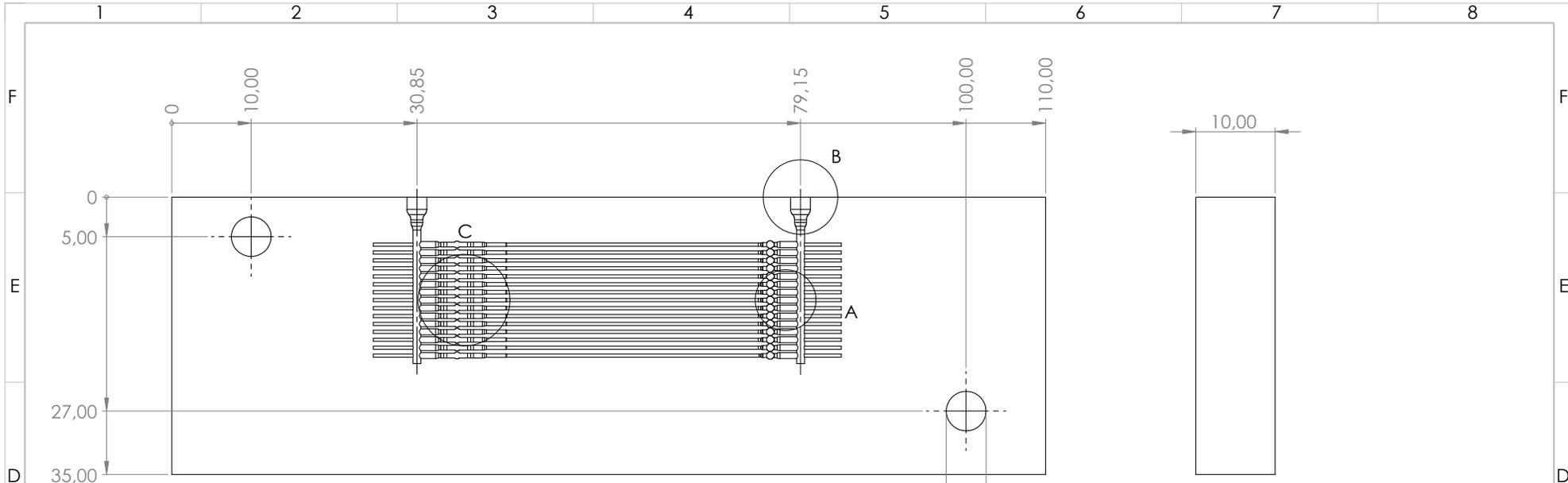


Figura 25. Temperatura de enfriamiento del prototipo 2 (a) PLA (b) Ecoflex (c) Ecovio [Elaboración propia].



| | | | |
|--------------------------------------|--|---|--|
| TEC Tecnológico de Costa Rica | | Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales | |
| Curso | | Proyecto final de graduación | |
| DIBUJ. | | M.BONILLA | 20/10/24 |
| VERIF. | | R.CORRALES | 28/10/24 |
| APROB. | | R.CORRALES | 28/10/24 |
| Sistema | | Material | TOLERANCIAS: LINEAL: ± 0.25 $\times 0.10$ $\times 0.05$ ANGULAR: $\pm 0.01^\circ$ Peso: -- gramos |
| Grado | | Proyecto: Molde para fabricación de plastifichas | |
| Escala | | Formato | |
| 2:1 | | A3 | |
| Unidades | | Hoja 1 de 5 | |
| mm | | 8 | |



| | | | | |
|--|--|---|---|--|
| Tecnológico de Costa Rica | | | Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales | |
| DIBUJ. M.BONILLA VERIF. R.CORRALES APROB. R.CORRALES | | | Curso: Proyecto final de graduación Grupo: Gr-1 | |
| Nombre: M.BONILLA Fecha: 20/10/24 | | | Designación: Pieza B | |
| Material: Acero P20 | | | Denominación: -- | |
| Sistema: | | TOLERANCIAS: LINEAL: X ± 0,25 X ± 0,10 XX ± 0,05 XXX ± 0,001 ANGULAR: ± 0,1° | | Proyecto: Molde para fabricación de plastifichas Escala: 2:1 Formato: A3 |
| Peso: -- gramos | | Unidades: mm | | Hoja 2 de 5 |

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

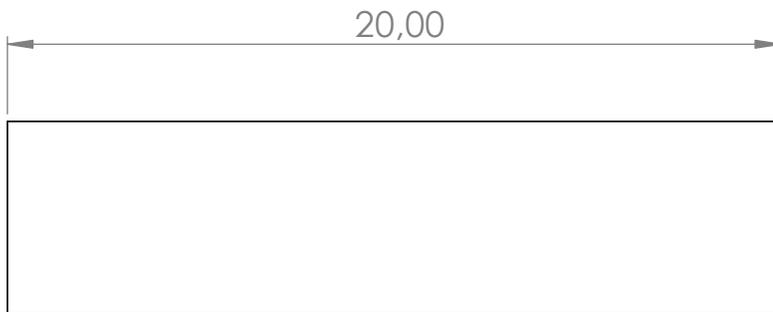
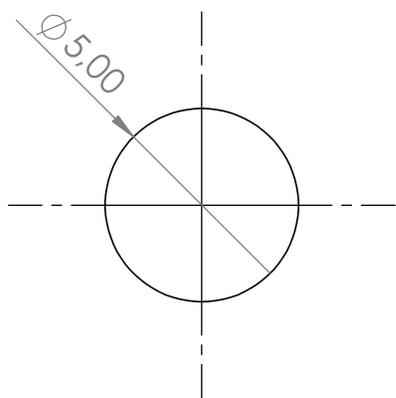
C

B

B

A

A



TEC | Tecnológico de Costa Rica



Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Curso: Proyecto final de graduación

Grupo: **Gr-1**

Designación: **Pasador**

Denominación: --

| | Nombre | Fecha |
|--------|------------|----------|
| DIBUJ. | M.BONILLA | 20/10/24 |
| VERIF. | R.CORRALES | 28/10/24 |
| APROB. | R.CORRALES | 28/10/24 |

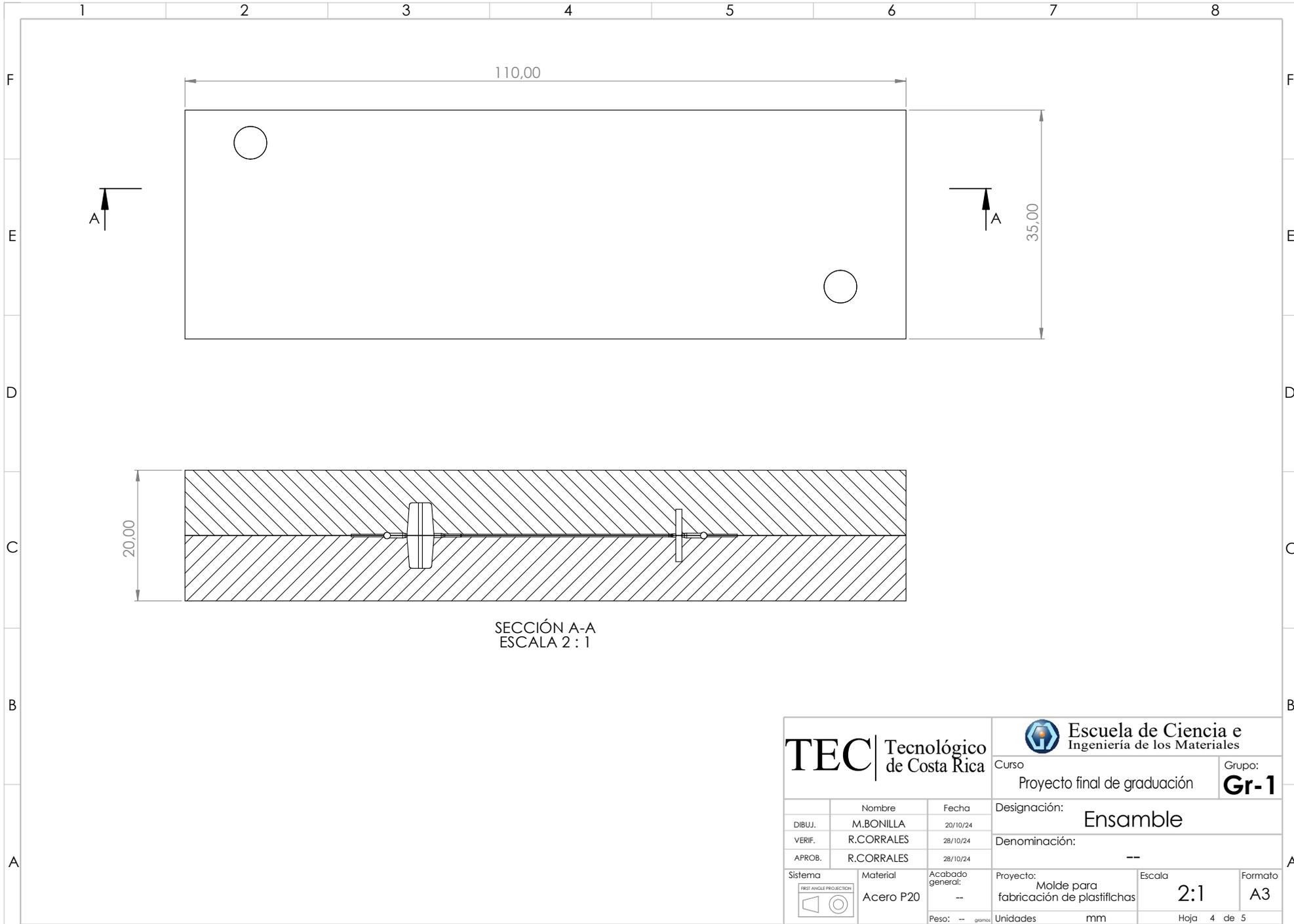
| | | | | | |
|-------------|-----------------|------------------|--|-------------|-----------|
| Sistema | Material | Acabado general: | Proyecto: | Escala | Formato |
| | Acero P20 | -- | Molde para fabricación de plastifichas | 5:1 | A4 |
| | Peso: -- gramos | Unidades | mm | Hoja 3 de 5 | |

4

3

2

1



A

A

20,00

110,00

35,00

SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1

| | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|------------------|---|-----------------------|---------|
| TEC Tecnológico de Costa Rica | | | Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales | | |
| | | | Curso Proyecto final de graduación | Grupo: Gr-1 | |
| | Nombre | Fecha | Designación: | | |
| DIBUJ. | M.BONILLA | 20/10/24 | Ensamble | | |
| VERIF. | R.CORRALES | 28/10/24 | Denominación: | | |
| APROB. | R.CORRALES | 28/10/24 | -- | | |
| Sistema | Material | Acabado general: | Proyecto: | Escala | Formato |
| | Acero P20 | -- | Molde para fabricación de plastifichas | 2:1 | A3 |
| | Peso: -- gramos | Unidades | mm | Hoja | 4 de 5 |

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

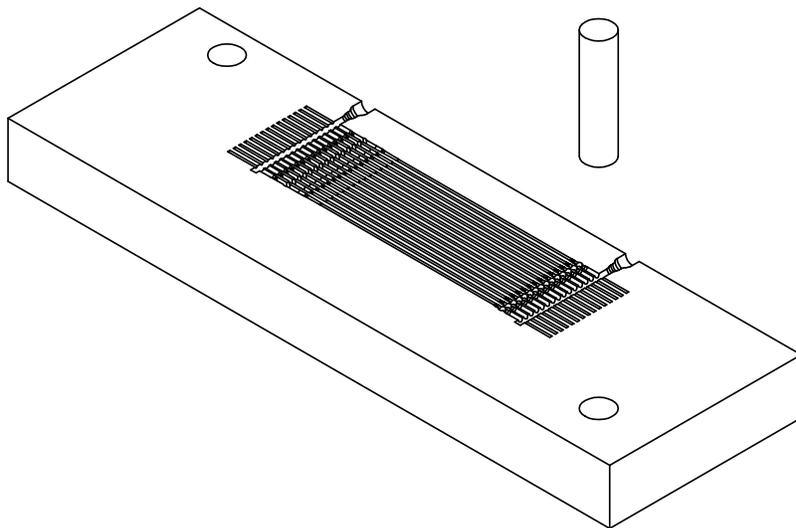
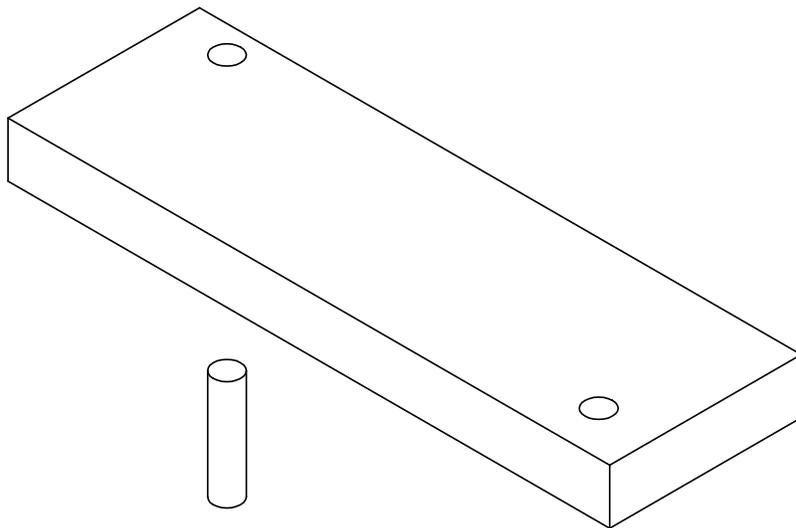
C

B

B

A

A



TEC | Tecnológico de Costa Rica



Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Curso: Proyecto final de graduación

Grupo: **Gr-1**

Designación: **Explosionado**

Denominación: --

| | Nombre | Fecha |
|--------|------------|----------|
| DIBUJ. | M.BONILLA | 20/10/24 |
| VERIF. | R.CORRALES | 28/10/24 |
| APROB. | R.CORRALES | 28/10/24 |

| | | | | | |
|-------------|-----------------|------------------|--|------------|-----------|
| Sistema | Material | Acabado general: | Proyecto: | Escala | Formato |
| | Acero P20 | -- | Molde para fabricación de plastifichas | 1:1 | A4 |
| | Peso: -- gramos | Unidades | mm | Hoja | 5 de 5 |

4

3

2

1