

**FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA RECUPERACIÓN
DE RESIDUOS DE PLA GENERADOS EN IMPRESIÓN 3D**

DAYANNA VILLA RESTREPO

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR:

PhD. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2022**

Pereira, mayo 2022

Nota de aceptación:

Firma del director de Proyecto

Quiero dar a gracias a mi familia, en especial a mis padres Hernando De Jesús Villa Osorio, María Liliana Restrepo López, a mis hermanos Sebastián Villa Restrepo, Luz Dey Villa Restrepo, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y por permitirme alcanzar este logro tan importante para mí como para ellos.

También quiero agradecer a José Luis Tristancho Reyes por darme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación bajo su dirección y permitirme desarrollar habilidades investigativas en mi proceso de formación profesional.

DAYANNA VILLA RESTREPO

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. RESUMEN..... | 9 |
| 2. INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 3. OBJETIVOS..... | 14 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL..... | 14 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 14 |
| 4. CAPITULO I..... | 15 |
| 4.1.1 Manufactura aditiva..... | 15 |
| 4.1.2 Plástico..... | 15 |
| 4.2 Concepto Manufactura Aditiva..... | 18 |
| 4.3 Los 10 principios de la manufactura aditiva..... | 19 |
| 4.4 Obtención Ácido láctico..... | 23 |
| 4.5 Qué hacer con el PLA..... | 24 |
| 4.6 Obtención del ácido poliláctico..... | 24 |
| 4.6.1 Propiedades..... | 29 |
| 4.6.2 Biodegradación del PLA..... | 31 |
| 4.6.3 Mejora de las propiedades de PLA..... | 32 |
| 4.7 Aplicaciones..... | 33 |
| 4.8 Las utilidades más destacadas del PLA son las siguientes:..... | 35 |
| 4.8.1. Materiales de embalajes..... | 35 |
| 4.8.2. En fibras..... | 36 |
| 4.8.3. Envases desechables:..... | 37 |
| 4.9 Desventajas:..... | 38 |
| 4.9.1 Reciclaje..... | 40 |
| 5. CAPITULO II..... | 42 |
| 5.1 Cómo está aportando Colombia en el reciclaje de los polímeros (PLA)..... | 42 |
| 5.2 ¿Por qué es importante reciclar?..... | 44 |
| 5.2.1 Plástico, la gran prioridad..... | 44 |
| 5.3 Plástico en Colombia..... | 45 |
| 5.3.1 Hacerlo bien desde el principio..... | 47 |
| 5.4 Bondades del plástico..... | 48 |

| | |
|---|----|
| 5.4.1 Cantidad de material transformado por las empresas en toneladas mensuales | 50 |
| 5.5 Obstáculos y desafíos | 50 |
| 5.6 Reciclaje de PLA en Colombia | 51 |
| 5.7 Lo difícil de reciclar PLA | 53 |
| 5.7.1 Proceso para reciclar PLA..... | 54 |
| 5.8 Convertir restos de impresión 3D en nuevo material de impresión | 55 |
| 5.8.1 Crear un propio filamento..... | 55 |
| 5.8.2 ¿Qué alternativas existen?..... | 56 |
| 5.9 MODELO A SEGUIR EN COLOMBIA | 56 |
| 5.9.1. RECOGIDA DE PLA | 56 |
| 5.9.2 Materiales utilizados en el proceso de limpieza | 57 |
| 6. Tres zonas por las que pasará el plástico reciclado..... | 61 |
| 6.2 Obtención de filmes..... | 62 |
| 6.1.1 Los pasos que se llevan a cabo son los siguientes:..... | 63 |
| 6.1.2. Espectrofotómetro FTIR-ATR..... | 63 |
| 6.1.3. Espectrofotómetro FTIR-ATR..... | 64 |
| 6.1.4. Calorímetro diferencial de barrido (DSC)..... | 64 |
| 6.1.5 Termobalanza (TGA)..... | 65 |
| 6.1.6. Viscosimetría..... | 66 |
| 6.2 Idea de negocio..... | 68 |
| 6.3. Descripción del mercado..... | 69 |
| 6.4. Segmentos de clientes..... | 69 |
| 6.5. Descripción del producto en relación con sustitutos y proveedores..... | 70 |
| 6.6. Análisis DAFO..... | 70 |
| 7. CAPITULO III | 74 |
| 7.1 Análisis económico..... | 74 |
| 7.2 Caracterización de la inversión..... | 74 |
| 7.2.1 Inmovilización de recursos:..... | 75 |
| 7.2.2 Flujos de caja de las operaciones..... | 75 |
| 7.3 Inmovilización de los recursos..... | 75 |
| 7.4 Costos de los equipos | 76 |
| 7.5 Costo total | 77 |

| | |
|--|----|
| 7.6 Capital circulante | 78 |
| 7.6.1 Calculo inmovilización de recursos | 78 |
| 7.6.2 Flujo de caja de operaciones | 78 |
| 7.6.3 Ingresos | 79 |
| 7.6.4 Costo de producción | 79 |
| -7.6.5 Materia prima | 80 |
| 7.6.6 Costo total del proyecto | 80 |
| 7.7 Impacto social y ambiental | 80 |
| 8. CAPITULO IV | 82 |
| 8.1 CONCLUSIONES | 82 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 85 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Estereoisómeros del ácido láctico | 23 |
| Figura 2. Condensación por deshidratación azeotrópica | 24 |
| Figura 3. Ejemplo de envases y embalajes fabricados con PLA | 32 |
| Figura 4. Variedad de productos desechables que se pueden fabricar con PLA | 34 |
| Figura 5. Estereoisómeros del ácido láctico | 36 |
| Figura 6. Filamento de PLA reciclado. | 38 |
| Figura 7. Cantidad de material transformado por empresas en toneladas mes | 45 |
| Figura 8. Desechos de PLA producidos por coronamakers | 51 |
| Figura 9. Lavado de PLA | 53 |
| Figura 10. Muestra de PLA triturado | 54 |
| Figura 11. Extrusora de doble husillo abierta, disposición de los husillos | 55 |
| Figura 12. Proceso de extrusión. | 56 |
| Figura 13. Esquema extrusor horizontal | 56 |
| Figura 14. Perfil de temperaturas de la extrusora | 58 |
| Figura 15. Prensa hidráulica de extrusor de platos calientes | 59 |
| Figura 16. Espectrofotómetro infrarrojo Nicolet is10 | 60 |
| Figura 17. Calorímetro TA-Q20 | 61 |
| Figura 18. Termobalanza TGA2050 | 61 |
| Figura 19. Montaje para determinar la viscosidad del PLA | 62 |
| Figura 20. Espectrofotómetro minolta CM-36006 | 63 |
| Figura 21. Ranking de empresas del sector fabricación de plásticos en formas primas. | 68 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Principales propiedades físicas y termodinámicas de ácido láctico | 19 |
| Tabla 2. Valores para el metodo Guthrie | 71 |
| Tabla 3. Factor de presión y material. | 71 |
| Tabla 4. Parámetros para el calculo del costo de los equipos | 71 |
| Tabla 5. Costo estimado de cada equipo | 72 |
| Tabla 6. Costo total del proyecto | 75 |

1. RESUMEN

La producción de plástico ha aumentado en la última década, y cada vez tiene más aplicaciones en la industria. Los plásticos son de gran importancia y tienen un papel fundamental en la economía, sociedad y medio ambiente que nos rodea. Es por esto que el aumento de la fabricación de productos basados en plástico hace que aumenten los recursos dedicados a la producción y la cantidad de residuos a gestionar derivados del uso de dichos productos.

Este proyecto se enfoca en un tipo de plástico específico, que pertenece a la familia de los bioplásticos y que engloba a plásticos biobasados y/o biodegradables, este es el poli(ácido láctico) (PLA). Se define como plástico biobasado por estar fabricado de recursos biológicos renovables como son el maíz o el azúcar. También, tiene la propiedad de ser biodegradable, es decir, es un material que, estando en ciertas condiciones, los microorganismos disponibles en el medio ambiente pueden convertirlo en recursos biológicos. Una de las principales aplicaciones del PLA es su utilización, en forma de filamento, para la impresión 3D. Es un mercado que está en continuo auge.

En la actualidad, se está investigando diferentes métodos de reciclaje para el PLA y otros polímeros. Los dos métodos más desarrollados, hasta entonces, son el reciclado mecánico y el compostaje industrial. El compostaje puede ser un proceso difícil de llevar a cabo ya que las condiciones de temperatura, humedad y tiempo requeridas para realizar este proceso son difíciles de mantener constantemente en compostadoras domésticas o locales, no industriales. Por lo tanto, el reciclado mecánico es el mejor con respecto al impacto ambiental y las condiciones requeridas para llevarse a cabo. El reciclado mecánico se lleva a cabo en varias etapas.

Tras el reciclado mecánico se debe estudiar si el polímero sigue mostrando sus propiedades dentro de unos niveles tales que pueda seguir utilizándose para aquellas aplicaciones en las que se requiera. A partir de aquí, se verá si el método de reciclado mecánico de PLA es útil en la cadena de valor y proporciona una segunda vida al

producto. Si la degradación es de unos niveles elevados, entonces se deberán utilizar otras técnicas de valorización energética como el compostaje o la combustión.

2. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición capaz de crear un objeto tridimensional mediante la superposición de capas sucesivas de un determinado material. Un proceso por el que se crean objetos físicos a través del aporte de un material en capas a partir de un modelo digital. Por lo tanto, se trata de un proceso en el que se crea un objeto físico en tres dimensiones a través de un objeto o modelos digitales mediante una impresora 3D que puede usar diferentes tecnologías y materiales para ir superponiendo capas hasta crear una réplica funcionalmente idéntica.

En el ámbito de la ingeniería la principal aplicación de la impresión 3D ha ido dirigida a mejorar la capacidad de prototipado rápido y de calidad, permitiendo así reducir plazos y lanzar nuevos productos rápidamente.

En la actualidad existen dos formas principales de tratar los residuos sólidos plásticos: reciclaje químico y mecánico. El reciclaje químico es un proceso de despolimerización que recupera monómeros de síntesis o productos químicos de materia prima y se convierte el material en moléculas más pequeñas para reutilizarlos como materia prima de nuevos petroquímicos y plásticos.

El reciclaje mecánico es una técnica que se utiliza para recuperar plásticos limpios, los polímeros se trituran y luego se procesan y se combinan para reutilizarlos, esta es una de las técnicas de reciclaje más utilizadas actualmente y es la ruta más económica y viable para la recuperación del plástico, cabe destacar que el PLA no se recicla porque al mezclar este polímero con otros se crea una contaminación la cual afectaría todo el proceso de reciclaje y ya no se podría volver a utilizar. Para lograr rescatar el material se tendría que reciclar solo el PLA y esto podría ser un poco más costoso para las empresas.

Uno de los principales problemas de la impresión 3D es la alta cantidad de material que queda inutilizado después de la fabricación de la pieza o las piezas defectuosas que no

quedan en las condiciones requeridas por el fabricante. Este hecho representa un gran problema para el medio ambiente. Una solución para estos residuos podría ser su reciclado, para volver a producir material para impresión 3D.

La impresión 3D y el posible reciclado de los residuos generados están muy relacionados con el concepto de economía circular, que está muy presente en la sociedad actual y es uno de los principales objetivos en la transformación industrial.

La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos.

El PLA es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico, que se obtiene a partir de recursos renovables al 100%, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad, fácil procesabilidad y buenas propiedades ópticas y de barrera, este biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones. Sus propiedades y estructura cristalina dependen de la concentración de los isómeros y el peso molecular. Por sus propiedades, el PLA tiene la capacidad de igualar e incluso mejorar muchas de las características de plásticos derivados de combustibles fósiles, lo que hace que sea eficaz para una gran variedad de usos. [14]

CAPITULO I: En este capítulo se hablará sobre las definiciones y los conceptos necesarios para la comprensión y desarrollo de este proyecto.

CAPITULO II: Este capítulo tratara sobre la metodología, desarrollo o procedimiento de análisis que se realizó para ejecutar el proyecto.

CAPITULO III: Se mostrarán los resultados obtenidos

CAPITULO IV: Se presentarán las conclusiones y las recomendaciones que surgieron de este proyecto.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL.

-Estudiar la fundamentación teórica de la recuperación de residuos de PLA en la impresión 3D.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

-Realizar una revisión bibliográfica sobre información referente a manufactura aditiva y el PLA para la impresión 3D.

-Hacer una búsqueda minuciosa acerca de cómo está aportando Colombia en el reciclaje de los polímeros (PLA).

-Investigar cuales son las empresas en Colombia que utilizan PLA para sus procesos de Impresión 3D.

4. CAPITULO I

4.1 ESTADO DEL ARTE

4.1.1 Manufactura aditiva: La tecnología de fabricación aditiva, incluye todos los procesos de unión de objetos 3D según la norma ASTM internacional F2792-12a 2010, se conoce como impresión tridimensional, procesos aditivos, técnicas aditivas, fabricación de capas aditivas, fabricación de capas, creación rápida de prototipos y solidos de forma libre.

4.1.2 Plástico: El término «plástico» se utiliza para describir una extensa gama de materiales sintéticos o semisintéticos que son utilizados para fabricar una gran cantidad de productos.

«Plástico» proviene del griego «plastikos», significa que se puede moldear. Se refiere a la maleabilidad, o plasticidad, del material durante la fabricación, lo que permite fundirlo, prensarlo o extrusionarlo para obtener diferentes formas (Plastic Europe, 2020).

En su mayoría, los plásticos son materiales orgánicos. La celulosa, el gas natural, la sal, el azúcar, el carbón y, por supuesto, el petróleo, son las principales materias primas que se utilizan para la producción de plásticos.

Estos se han convertido en un material clave de la sociedad, ya que, con un uso responsable, permiten abastecer las necesidades de hoy en día además del cuidado del medio ambiente.

Los plásticos abarcan una gran cantidad de materiales que se pueden dividir en varios grupos. Algunos ejemplos son:

- **Biobasados:** estos plásticos se fabrican a partir de recursos biológicos renovables. Dentro de este grupo podemos destacar el poli (ácido láctico) (PLA), el bio-PET y bio-PE. Se utilizan principalmente para la fabricación de envases, en la industria textil, industria de embalaje y para la fabricación de material médico.

- **Plásticos biodegradables:** son plásticos que los microorganismos pueden degradar y convertir en agua, dióxido de carbono y biomasa, si son sometidos a unas determinadas condiciones. Se utilizan en muchas aplicaciones únicas o de poca duración, como, por ejemplo, en la recogida de residuos orgánicos, industria agrícola y en el envasado de alimentos.

- **Plásticos técnicos:** se caracterizan por ser unos plásticos que requieren una o varias propiedades excelentes, mecánicas o de otro tipo, con prestaciones casi únicas. Sus principales aplicaciones son en aparatos de electrónica, construcción y edificación y para revestimientos resistentes a la corrosión y abrasión.

- **Resinas epoxi:** son una de las familias de polímeros con mayor utilización. La mayoría son termoestables, no termoplásticos. Tienen la propiedad de cambiar desde un estado de líquido con baja viscosidad a un estado sólido con punto de fusión elevado. Entre sus principales aplicaciones se destacan su utilización para pinturas y revestimientos, aplicaciones marinas, adhesivos, biología, arte, etcétera.

- **Fluoro polímeros:** son una familia de plásticos que se caracterizan por su alto rendimiento. Se puede destacar el politetrafluoroetileno (PTFE). Este plástico es considerado como uno de los más resbaladizos que existe, esto lo convierte en uno de los más valiosos y versátiles que hay en el mercado. Su utilización se extiende desde la industria aeroespacial, construcción y arquitectura hasta la fabricación de aparatos electrónicos.

- **Poliolefinas:** a esta familia pertenecen los polietilenos y polipropilenos. Se obtienen a partir del petróleo mediante los procesos de polimerización del etileno y el propileno. Dentro de los polietilenos se distinguen en función de si tienen alta o baja densidad. Se destacan el polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), polietileno de alta densidad (HDPE).

Se usan masivamente en todos los campos (agricultura, automoción, construcción, textiles, envasado y embalaje, medicina...). De hecho, esta familia supone más del 50 %

de todos los plásticos empleados en la actualidad. Algunas aplicaciones son envases de alimentos, film extensible, bolsas de la compra, cajas y contenedores, tuberías, fibras textiles, mobiliario, etc.

- **Poliestireno (PS):** su elaboración se realiza a partir del monómero de estireno, un petroquímico líquido. Puede ser transparente, duro y quebradizo (PS cristal) o moldearse en forma de espuma (poliestireno expandido, EPS), un material que proporciona buen aislamiento térmico y acústico, con importantes aplicaciones en envases y embalajes.

- **Poliuretanos (PUR):** son materiales de enorme adaptabilidad y disponibilidad que sobresalen por ser resilientes, flexibles y duraderos. Destacan entre los fabricantes por ser asequibles y reciclables. Entre sus aplicaciones se puede destacar su utilización para el aislamiento de edificios, calzado, mobiliario y camas, refrigeradores y adhesivos.

- **Policloruro de vinilo (PVC):** fue de los primeros plásticos en descubrirse. Es utilizado para tuberías y conductos, productos médicos, calzado, etc.

- **Manufactura aditiva:** “Tecnología capaz de trasladar un modelo sólido y virtual en modelos físicos en un rápido y sencillo proceso” -Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2014).

- **Herramientas:** Elementos especializados que intervienen en la transformación de la materia prima en productos con valor agregado.

- **Impresión 3D:** Término frecuentemente utilizado en mercadeo y publicidad para referirse a la tecnología de la fabricación digital aditiva.

- **Máquina:** Materialización o instrumentalización del conocimiento (técnica y tecnología) en un objeto para la consecución de un objetivo un fin, impulsado con energía distinta a la humana.

- **Materiales:** Materia prima para la elaboración de productos terminados con valor agregado.
- **Procesos:** Integración de materiales y herramientas en una serie de etapas coherentes y dirigidas para la elaboración de productos con valor agregado.
- **Producto:** Materialización de una solución propuesta en el desarrollo de un proyecto.
- **Prototipo:** Representación formal de una solución objetual propuesta teniendo en cuenta consideraciones sobre su fabricación para distribución comercial.

4.2 Concepto Manufactura Aditiva

La Impresión 3D no es una tecnología reciente, y su nombre obedece a razones de mercado más que a razones teóricas. La impresión 3D ha tomado impulso rápidamente desde mediados de la década de los 80's, pero ha sido solo hasta los últimos años que ha experimentado un auge significativo debido principalmente al avance en el poder computacional, desarrollos de software, nuevos materiales y el internet Lipson, H., & Kurman, M. (2013).

La tecnología descrita en este texto fue originalmente referida como prototipado rápido. El termino Rapid Prototyping (RP) es usado en diversas industrias para describir un proceso de fabricación para la creación rápida de un sistema o una representación objetual, antes de la comercialización y el lanzamiento final (Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014).

El concepto general radica en fabricar rápidamente y su resultado será un prototipo o un modelo base del cual se desarrollarán futuros modelos y el producto final. En el entorno del desarrollo de producto, el termino (PR) también fue ampliamente usado para describir las tecnologías que fabricaban objetos físicos directamente desde información digital (Lipson, H., & Kurman, M. 2013).

Manufactura aditiva (AM) por sus siglas en inglés, es definida y como se entenderá en esta investigación, como un grupo de técnicas que son capaces de trasladar un modelo sólido digital de información a un modelo físico en un proceso rápido y eficiente (Lipson, H., & Kurman, M. (2013); Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. 2014; Ford, S. J., Mortara, L., & Minshall, T. H. 2015). “Aditivo “viene del latín Additivus⁴, que significa agregar, adicionar, sumar, y se refiere al hecho de que uno de los principios básicos de funcionamiento es depositar o unir secuencial y sistemáticamente el material requerido hasta terminar el sólido, un objeto tridimensional fabricado por planos. “Manufactura” viene del griego manus⁵(Mano) y Facto (fabricar) que se refiere al hecho de crear esas capas de acuerdo con alguna clase de proceso predecible, repetible y sistemático.

4.3 Los 10 principios de la manufactura aditiva

Esta proliferación en la integración en diversas industrias es el resultado del dominio sobre las capacidades técnicas y tecnológicas de la (FA), el dominio sobre lo que Mel Kurtman y Hod Lipson en su libro “Fabricated – the new world of 3d printing Pag. 21” definen como los 10 principios o posibles reglas que dirigen la generación de productos; Estos principios fueron desarrollados a través de la entrevista de más de 30 profesionales en el área.

Normalmente las personas mencionan 3 ventajas de la fabricación aditiva recurrentes adquiridas desde los principios ingenieriles, reducción de tiempo, reducción de costos y libertad de complejidad formal, es así como también se establecen otros 7 principios para su aplicación eficiente:

- **Principio uno:** Complejidad de manufactura Gratuita

En la fabricación tradicional, entre más compleja sea su forma más costosa será su producción, con fabricación digital aditiva complejidad vale lo mismo que simplicidad. La libre complejidad transformará el costo tradicional de los modelos y modifica los rangos de costos de producción.

- **Principio dos:** La variedad es Gratis

Una impresora 3D sencilla puede realizar diversas formas consecutivas, con la fabricación tradicional, las líneas de producción deben detenerse a veces hasta días y semanas enteras para modificar el producto fabricar. La fabricación aditiva solo necesita cambiar el archivo CAD y estará lista.

- **Principio tres:** No se requiere ensamble

La fabricación tradicional requiere que las piezas sean ensambladas para terminar los productos, entre más complejo sea el producto más piezas tendrá, lo que aumentara el tiempo y dinero, con la fabricación aditiva se pueden fabricar los ensambles y encajes de múltiples piezas a la vez. Cadenas de producción más cortas reducirán la huella de carbono.

- **Principio cuatro:** Cero tiempos de espera

Una impresora 3D puede fabricar en demanda cuando un objeto es necesitado, la capacidad de fabricación en el punto reduce el espacio de almacenamiento. Modelos. de negocios distintos en servicios se convierten en posibles a medida que la tecnología va avanzando, especializándose y personalizándose – productos en demanda en respuesta a las órdenes del consumidor-.

- **Principio Cinco:** Espacio de Diseño sin limites

Las técnicas de fabricación tradicionales y los artistas pueden solo fabricar cierto tipo de formas. Nuestra capacidad para configurar formas está limitada por las herramientas que poseamos, a los dispositivos que consciente o inconscientemente elijamos. Por ejemplo, un torno de madera puede hacer solo objetos cilíndricos, una fresa puede hacer solo formas accesibles a una fresadora, una inyectora puede únicamente fabricar formas que sean desmoldantes. El dispositivo de fabricación digital aditiva nos libera de esas restricciones y nos abre a la fabricación de formas que solo eran posibles en la naturaleza hasta hoy.

- **Principio Seis:** Cero habilidades de manufactura

Los artistas tradicionales practican y se entrenan durante años para desempeñar un rol. La manufactura digital y las máquinas guiadas por computador reducen la necesidad de mano de obra calificada para la fabricación de los objetos, reduciendo costos.

- **Principio Siete:** Manufactura portable y compacta

Por volumen de producción, una impresora 3D tiene más capacidad de manufactura que una máquina de inyección tradicional. Por ejemplo, una máquina inyectora solo puede fabricar objetos significativamente más pequeños que ella, una impresora 3D puede fabricar objetos igual de grandes a ella.

- **Principio Ocho:** Menor desperdicio por producto

Las máquinas que trabajan con metal tienen una tasa de desperdicio significativamente menor al de técnicas de fabricación tradicional. Otros procesos de fabricación demandan grandes cantidades de materiales para desarrollar la serie, desperdiciando o subutilizando porcentajes significativos de material. La manufactura aditiva aprovecha el 100% del material utilizado.

- **Principio Nueve:** Gradaciones de material infinitas

Combinar distintos materiales en un producto es un proceso complejo usando las máquinas de hoy, debido a que estas escarban, cortan y moldean las piezas; A medida que la fabricación aditiva se desarrolla, obtendremos la capacidad de fundir y mezclar diversos materiales, nuevos materiales permitirán una nueva paleta de materiales con propiedades y comportamientos para el desarrollo de productos.

- **Principio Diez:** Reproducción física precisa

Hoy un archivo de música puede ser copiado múltiples veces sin perder calidad, la manufactura aditiva nos permite extender nuestro control y precisión sobre el mundo físico objetual, escanaremos, editaremos y duplicaremos objetos físicos creando réplicas de la original. Grandes obras de maestros artistas del renacimiento o del gótico

pueden ser reproducidas con 100% de fidelidad nunca vista, así como artefactos y objetos religiosos de la edad feudal, la civilización griega o la edad de bronce.

Estos 10 principios planteados evidencian las ventajas y oportunidades susceptibles de ser utilizadas en el diseño y desarrollo de Producto, y son una guía para entender las nuevas dinámicas y modelos de negocio que la tecnología ofrece. Estos son resultados del avance de la técnica en el último siglo, pero, y como se ha hecho evidente hasta este punto, nuestro enfoque ha sido constantemente sobre la instrumentalización de la tecnología: la máquina y algunos de sus momentos clave en el desarrollo técnico y tecnológico; Pero hemos dejado - y apropósito- a un lado la perspectiva del operador, del ser humano detrás de la técnica y la tecnología, del diseñador, cabe decir que, el avance homogéneo entre la técnica y tecnología de fabricación aditiva y el cambio del modelo de pensamiento no ha sucedido al mismo ritmo.

• **Ácido láctico:**

Un ácido (del latín acidus, que significa agrio) es considerado tradicionalmente como cualquier compuesto químico que, cuando se disuelve en agua, produce una solución con una actividad de catión hidronio mayor que el agua pura, esto es, un pH menor que 7.

Los ácidos pueden existir en forma de sólidos, líquidos o gases, dependiendo de la temperatura. También pueden existir como sustancias puras o en solución. El ácido láctico, o su forma ionizada, el lactato, es un compuesto químico que juega importantes roles en diversos procesos bioquímicos, como la fermentación láctica. Es un ácido carboxílico, con un grupo hidroxilo en el carbono adyacente al grupo carboxilo, lo que lo convierte en un ácido hidroxílico (AHA) de fórmula $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}(\text{OH})-\text{COOH}$ ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$).

El ácido láctico es un compuesto incoloro, es un líquido viscoso y no volátil, su masa molecular es de 90,08 g/mol. El ácido láctico es inofensivo en grandes cantidades en mamíferos y humanos. Es sumamente soluble en agua. Se descompone fácilmente a la biosfera con formación de moléculas de agua y CO_2 , que no son nocivos para el medio ambiente. El ácido láctico se utiliza además de monómero para la obtención del ácido poliláctico (PLA), como un acidulante en alimentos. Si se convierte a ésteres se puede

utilizar como un disolvente verde para la limpieza de metales, pinturas, y recubrimientos. Es miscible en agua y etanol, y exhibe baja volatilidad. Algunas de las propiedades físicas y termodinámicas del ácido láctico están detalladas en la Tabla 1. El ácido láctico es utilizado ampliamente en la industria alimenticia, química, farmacéutica, del plástico, textil, la agricultura, la alimentación animal, entre otros.

| <i>Propiedades físicas y termodinámicas</i> | |
|---|---|
| Fórmula | $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$ |
| Peso molecular | 90,08 g/mol |
| Temperatura de fusión | 53°C (formas puras), 16,8°C (para mezcla racémica) |
| Temperatura de ebullición | 122°C (12 mmHg) |
| Estructura cristalina | S-ácido láctico: ortorrómbico |
| Densidad del sólido | 1,33g/ml (20°C) |
| Densidad del líquido | 1,224 g/ml (20°C, 100% subenfriado) |
| Solubilidad en agua | 86 m/m% (20°C) |
| Calor de fusión | 16,8 kJ/mol (para L(+)) |
| Calor de formación | - 693,4 kJ/mol (para L(+)) |
| Capacidad calorífica | 1,41 J/(mol·K) (para ácido láctico cristalino a 25°C) |
| Viscosidad | 28,5 mPas (sol. en agua al 85,3%, 25°C) |
| pKa | 3,86 |

Tabla 1. Principales propiedades físicas y termodinámicas de ácido láctico

4.4 Obtención Ácido láctico

El ácido láctico es el ácido carboxílico más común en la naturaleza. Fue descubierto en 1780 por el químico experimental Carl Wilhelm Scheele quien lo aisló del suero de leche agria, aunque no fue hasta 1881 cuando fue producido industrialmente por Charles Avery en Littleton, Massachusetts, obteniéndolo por un proceso de fermentación de azúcares vegetales. En 1950, en Japón, empezó la producción de ácido láctico sintético mediante lacto nitrilo. Éste se obtenía a partir de acetaldehído y ácido cianhídrico, y se hidrolizaba posteriormente para obtener el ácido láctico. El ácido láctico se puede fabricar tanto por fermentación de carbohidratos como por síntesis química. La vía química o petroquímica de obtención del ácido láctico, donde el ácido láctico producido por esta vía es una mezcla racémica ópticamente activa de L (+)- y D (-)- enantiómeros. La producción petroquímica del monómero prevaleció hasta fines de 1990, cuando fue economizado el proceso de fermentación.

Durante unas décadas, el ácido láctico sintético y el obtenido por fermentación compitieron industrialmente, aunque desde la década de los 90 prácticamente todo el ácido láctico proviene de la fermentación. Esto se debe a que es más respetuosa con el

medio ambiente, y, además, la ruta sintética tiene bastantes limitaciones importantes, como una capacidad limitada debido a la dependencia de un subproducto de otro proceso, inhabilidad para obtener sólo el isómero deseado L, y unos costes de obtención elevados.

4.5 Qué hacer con el PLA

Según la jerarquía de residuos producidos por los polímeros biodegradables, estos pueden tener varios escenarios de fin de vida. Las dos formas menos perjudiciales para el medio ambiente son la reutilización y el reciclado. Sin embargo, la reutilización es complicada en algunos polímeros, como el estudiado en este trabajo (PLA), ya que es utilizado en envasado de alimentos o embotellado y tiene una vida útil corta.

Al igual que la producción de bioplásticos debe ir en constante aumento, para así reducir el impacto en el medio ambiente, se debe utilizar aquellos escenarios de fin de vida que generen el menor impacto negativo sobre el medio ambiente. Además, deben ser económica y técnicamente viables.

Los polímeros biodegradables son aquellos capaces de descomponerse por la acción de microorganismo en un período de tiempo corto. La descomposición puede darse en presencia o ausencia de oxígeno. En el primer caso, los productos que se obtendrían son: dióxido de carbono, agua, sales minerales y biomasa. Si se trabajase en ausencia de oxígeno se obtendría: dióxido de carbono, metano, sales minerales y productos derivados de la biomasa. Los polímeros biodegradables proporcionan un final de vida útil del producto de manera controlada, evitando así el vertido incontrolado de estos a ríos, mares, bosques.

4.6 Obtención del ácido poliláctico

El poli (ácido láctico) (PLA) es uno de los principales sustitutos de los termoplásticos derivados del petróleo. Se utiliza principalmente como un termoplástico reutilizable y renovable. El desarrollo de un mayor conocimiento y preocupación del medio ambiente en la sociedad actual está provocando un mayor interés por la utilización de los bioplásticos. Estos están empezando a sustituir a los plásticos tradicionales, derivados

del petróleo, ya que nos proporcionan unas propiedades muy similares, además de algunas ventajas medioambientales.

La obtención ocurre generalmente en dos etapas consecutivas: la primera la síntesis del ácido láctico y la segunda la polimerización.

La obtención del ácido láctico ha sido ampliamente estudiada y desarrollada. El primer paso en el proceso es la extracción del almidón de la biomasa. Industrialmente se utilizan como sustratos, sacarosa proveniente de azúcar de caña y remolacha azucarera, lactosa proveniente de lactosuero, y dextrosa procedente de almidón hidrolizado. La sacarosa refinada y glucosa son los más utilizados.

Para la extracción del almidón de productos no refinados se realiza un molido húmedo. El almidón obtenido se convierte en azúcar por hidrólisis enzimática o ácida. Bacterias fermentan entonces el licor azucarado. *Lactobacillus delbrueckii* es el microorganismo utilizado en la producción industrial, ya que tiene la ventaja de consumir eficientemente glucosa y ser termófilo con temperatura óptima de crecimiento en el rango de 45 a 62°C, lo que reduce costos de enfriamiento y esterilización, así como riesgos de contaminación microbiológica en el fermentador.

En el método de obtención comercial, al sustrato se le adiciona una fuente de vitaminas y de cofactores, se utiliza una mezcla de 10 a 15 % de glucosa, 10% CaCO₃, cantidades menores de fosfato de amonio y extracto de levadura. El medio se inocula y se agita sin aireación para optimizar la neutralización del ácido formado. La fermentación dura entre 2 a 4 días y se termina cuando todo el azúcar es consumido, con el fin de facilitar la purificación. Al final de la fermentación el medio es ajustado a pH 10 y calentado para solubilizar el lactato de calcio y coagular proteínas presentes. Posteriormente el medio se filtra para remover sustancias insolubles, así como biomasa. Después de concentrar por evaporación, el ácido libre se obtiene por adición de ácido sulfúrico seguido de filtración para remover el sulfato de calcio formado.

La conversión alcanza en general valores por encima del 95% en sustrato de carbohidratos. La fermentación puede realizarse tanto en procesos batch como

continuos. El ácido láctico debe separarse del cultivo fermentable y purificarse antes de la polimerización en la mayoría de los casos. Los procesos de purificación más comunes involucran neutralización con bases seguido por filtración, concentración y acidificación.

Se han desarrollado dos vías fundamentales para convertir el ácido láctico en polímeros de alto peso molecular: el proceso indirecto vía láctico, cuyo producto se denomina poliláctico, y el proceso directo de polimerización por policondensación, produciendo ácido poliláctico. Ambos productos son agrupados bajo la denominación PLA.



Figura 1: Estereoisómeros del ácido láctico (Lasprilla, y otros, 2010).

• Polimerización del PLA

El ácido poli láctico se puede obtener básicamente por tres vías: vía policondensación del ácido láctico, deshidratación isotrópica y vía polimerización por apertura de anillo del láctida.

- **Poli condensación**

El ácido láctico se polimeriza en grandes cantidades para obtener moléculas de PLA de bajo peso molecular, de apariencia vidriosa y frágil. Este producto tiene aplicaciones reducidas, a menos que se adicionen agentes de acoplamiento externo para aumentar su peso molecular (Condensación- polimerización directa).

- **Polimerización por condensación azeotrópica**

El ácido láctico se polimeriza en presencia de solventes para obtener PLA de un peso molecular alto. (Condensación azeotrópica deshidratativa).

Polimerización por apertura de anillo Esta ruta comprende la purificación, apertura y polimerización para obtener moléculas de alto peso molecular, desarrollado por Cargill Inc.

El método de condensación por deshidratación azeotrópica (Fig. 2) se comercializó por Mitsui Toatsu Chemicals, este es un proceso en donde el ácido láctico y un catalizador son deshidratados azeotrópicamente a reflujo a alta ebullición, mediante solventes apróticos (sin protones) a bajas presiones para obtener PLA con un peso molecular mayor de 300.000. Por lo tanto, la polimerización por condensación azeotrópica es un método para obtener polímero de alto peso molecular sin emplear agentes extensores o coadyuvantes. El procedimiento general por esta ruta consiste en la destilación a presión reducida del ácido láctico, durante 2 o 3 horas a 130°C para eliminar la mayoría del agua de condensación. Se añaden catalizadores y difenil éter, después se fija al recipiente de reacción un tubo relleno con tamiz molecular de 3 A. El disolvente de reflujo se retorna al recipiente pasando a través del tamiz molecular durante 30-40 horas a 130°C. Después el polímero se separa tal cual o se disuelve y se precipita para ser posteriormente purificado.

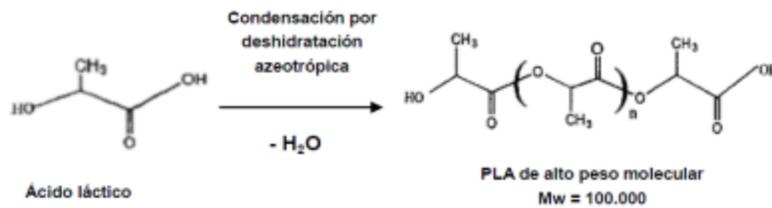


Figura 2. Condensación por deshidratación azeotrópica

• Poli condensación del ácido láctico

En la polimerización por condensación, la reacción toma lugar entre dos moléculas poli funcionales para producir una gran molécula poli funcional con posible eliminación de pequeñas moléculas como el agua. El monómero del ácido láctico presenta tanto grupos hidroxilo como carboxilo; esto con lleva que la reacción se produzca directamente por auto condensación.

La policondensación es una polimerización por crecimiento en etapas, e implica una reacción química entre moléculas de monómeros poli funcionales. En una reacción en etapas, las cadenas en crecimiento reaccionan entre sí formando cadenas más largas. Esto es aplicable a cadenas de cualquier longitud, a diferencia de la polimerización por crecimiento en cadena, en que los monómeros únicamente pueden reaccionar con cadenas en crecimiento. Este proceso debe ser llevado a cabo a menos de 200 C; encima de esa temperatura, se genera el monómero de láctida entrópicamente favorecido. Esta reacción genera un equivalente de agua por cada etapa de condensación, y que no es deseable porque hace que el agua de transferencia de cadena que lleva a material de bajo peso molecular. La condensación directa por lo tanto se lleva a cabo de una manera gradual, donde el ácido láctico se oligomeriza primero a oligómeros PLA. A partir de entonces, la policondensación se lleva a cabo en la masa fundida o como una solución, donde las unidades oligoméricas cortos se combinan para dar una hebra de alto peso molecular. La eliminación del agua mediante la aplicación de un vacío o por destilación azeotrópica es crucial para favorecer policondensación más de transesterificación.

La poli condensación de ácido láctico se realiza con o sin catalizador, mientras el vacío y la temperatura aumentan de forma progresiva. Aunque los poliésteres de alto peso molecular y buenas propiedades mecánicas son difíciles de obtener, las propiedades de los oligómeros de ácido láctico pueden ser controladas por el uso de diferentes catalizadores y agentes de funcionalización, o por la variación de las condiciones de polimerización. Los mecanismos sugeridos para la policondensación son básicamente los mismos que los de la química orgánica de moléculas pequeñas. Por tanto, se puede considerar como una sencilla reacción ácido-base de Lewis con el hidróxido nucleofílico como base de Lewis atacando la posición carbonilo electrofílico seguido por la pérdida de un protón.

4.6.1 Propiedades

Las propiedades físicas y mecánicas, farmacéuticas y de reabsorción dependen de la composición del polímero, de su peso molecular y de su cristalinidad. La cristalinidad puede ajustarse desde un valor de 0% a 40% en forma de homopolímeros lineales o ramificados, y como copolímeros al azar o de bloque.

La temperatura de procesamiento está entre 60 y 125°C y depende de la proporción de D o L ácido láctico en el polímero. Sin embargo, el PLA puede ser plastificado con su monómero o alternativamente con ácido láctico oligomérico y esto permite disminuir temperatura.

El PLA tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de los polímeros petroquímicos, a excepción de una baja elongación. Sin embargo, esta propiedad puede ser afinada durante la polimerización (por copolimerización) o por modificaciones post polimerización (por ejemplo, plastificantes).

El PLA puede ser tan duro como el acrílico o tan blando como el polietileno, rígido como el poliestireno o flexible como un elastómero. Puede además ser formulado para dar una variedad de resistencias. Las resinas de PLA pueden ser sometidas a esterilización con

rayos gama y es estable cuando se expone a los rayos ultravioleta. Al PLA se le atribuyen también propiedades de interés como la suavidad, resistencia al rayado y al desgaste.

Sus propiedades mecánicas son buenas en comparación con otros biopolímeros, pero presentan, sin embargo, baja resistencia al impacto (aumenta al aumentar la cristalinidad y el peso molecular). Puede presentar en algunos grados dureza, rigidez, resistencia al impacto y elasticidad similares a las del PET, pero es más hidrofílico y tiene una densidad más baja. El PLA puede ser tan duro como el acrílico o tan blando como el polietileno, rígido como el poliestireno o flexible como un elastómero.

Las resinas de PLA pueden ser sometidas a esterilización con rayos gama y es estable cuando se expone a los rayos ultravioleta. Al PLA se le atribuyen también propiedades de interés como la suavidad, resistencia al rayado y al desgaste. Además, se puede procesar, como la mayoría de los termoplásticos, en fibra (por ejemplo, usando el proceso convencional de hilatura por fusión) y en película. En definitiva, El PLA se puede formular para ser tanto rígido como flexible y copolimerizarse con otros materiales. Su buena biocompatibilidad lo ha llevado a ser ampliamente utilizado en el campo de la medicina bioquímica.

El PLA de alto peso molecular se ha utilizado para producir suturas quirúrgicas que no se desmontan y el de bajo peso molecular como agente de envasado de fármacos de liberación lenta (Vasir et al., 2007).

En general, el PLA es soluble en dioxanos, acetonitrilo, cloroformo, cloruro de metileno, 1,1,2 tricloroetano y ácido dicloroacético (depende de su grado de cristalinidad). El PLA presenta unas propiedades de barrera aceptables respecto al oxígeno, al agua y al dióxido de carbono, aunque a veces se consideran insuficientes para algunos envases de alimentos. Los coeficientes de permeabilidad para el dióxido de carbono se encuentran entre los del poliestireno y el PET.

4.6.2 Biodegradación del PLA

Una de las propiedades que ha creado un gran interés en el PLA es su capacidad de biodegradarse bajo condiciones adecuadas a diferencia del resto de los polímeros. Lo que le confiere una gran ventaja desde el punto de vista ecológico. Además, es un polímero obtenido de recursos renovables.

El hecho de que durante la fase biológica el PLA libere dióxido de carbono y metano se ha cuestionado ya que son sustancias que participan en el efecto invernadero. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el balance neto en dióxido de carbono es nulo ya que el CO₂ emitido a la atmósfera es aquel que fue absorbido durante la fotosíntesis de la planta. También ha sido criticado por el hecho de necesitar combustibles fósiles para producir el PLA. Estos combustibles no se emplean en el polímero en sí mismo, sino que son necesarios para los procesos de cosecha y recogida de la planta, así como en su producción química. De hecho, los productores de ácido poliláctico han reconocido que se emplean los combustibles fósiles para producir el plástico, pero manifiestan que durante su fabricación se requiere entre 20 y 50% menos de recursos fósiles que aquellos que aquellos plásticos que provienen del petróleo (Mariano, 2011).

Además, los recursos fósiles que suelen emplear son los que se encuentran en una mayor cantidad como son el carbón y el gas natural y se están realizando investigaciones para poder hacer uso de la biomasa.

Por otra parte, hay que resaltar que la tecnología empleada para la fabricación de PLA es muy reciente, solamente han pasado 10 años frente a los casi 100 de existencia de la petroquímica del plástico, durante los cuales ha ido mejorando. Otro de los inconvenientes del PLA puede ser el hecho de que al crecer su consumo se deberá generar mayor cantidad de sembradíos para satisfacer la demanda de materia prima para su obtención, lo que elevaría el desmonte de los suelos para ser sembrados.

4.6.3 Mejora de las propiedades de PLA.

A pesar de que el ácido poliláctico tenga una buena biocompatibilidad y capacidad de estiramiento, las propiedades de este polímero aparentemente prometedor no son perfectas y aún deben mejorarse (Zalusky et al., 2002).

Por ejemplo, el PLA es extremadamente hidrófobo lo que hace que se convierta en inadecuado para la administración de fármacos, y su baja tenacidad al impacto hace que tenga ciertas desventajas como material para implantes en el campo del trasplante óseo en un entorno de alta resistencia mecánica (Agrawal y Athanasiou, 1997).

Sin embargo, existen varios métodos para mejorar de manera eficaz las deficiencias anteriores del PLA y hacerlo más adecuado para su aplicación en diversos campos. Estas propiedades, se pueden mejorar añadiendo aditivos modificados durante su síntesis o mezclándolo directamente con otros polímeros como por ejemplo el ácido poliglicólico que su adición puede conducir a un polímero amorfo con una Tg más baja.

El efecto de mezcla es asombroso ya que se observan propiedades físicas y mecánicas superiores a las del polímero original (Maiti et al., 2002). Los copolímeros con baja Tg y flexibilidad obtenidos pueden ser más adecuados para su uso en dispositivos médicos implantables y sistemas de administración de fármacos (Vaz, 2005; Luckachan et al., 2011). Por lo tanto, se está prestando cada vez más atención a mejorar el comportamiento a baja temperatura y la maleabilidad del ácido poliláctico.

La biocompatibilidad del PLA también puede verse modificada mediante el método de mezcla, empleando almidón (Nampoothiri et al., 2010). Esto presenta una ventaja y es que es un método de bajo costo y simple con respecto a sintetizar copolímeros que también cambian las propiedades mecánicas. Por un lado, este método presenta una ventaja y es que la absorción del agua se ve mejorada, pero por otro lado presenta una desventaja y es que la acumulación de almidón conduce a una reducción de la resistencia a la tracción y al alargamiento, es decir aumenta la fragilidad del material.

Esta deficiencia se puede compensar agregando plastificantes como el poliéster, ácido cítrico de bajo peso molecular, el ácido succínico, el ácido tartárico y el oxalato que se mezclan con PLA para cambiar sus propiedades mecánicas y termodinámicas hasta desarrollar un buen polímero hidrófilo, no tóxico, biodegradable, biocompatible y flexible. (Li et al., 2020). Según Li et al. (2020) se ha observado que la adición de estos plastificantes consigue reducir la Tg del PLA en 26°C.

4.7 Aplicaciones

La aplicación más prometedora del PLA es en envases y empaques para alimentos y producción de películas para la protección de cultivos en estadios primarios. Sin embargo, el alto crecimiento fúngico en los materiales obtenidos de bases biodegradables es un factor negativo para el uso en alimentos. Por lo tanto, los bioempaques son más convenientes para alimentos con alta respiración y de vida de almacenamiento corto como vegetales, y para el empaque de algunos productos de panadería.

En los tejidos vivos, el PLA se despolimeriza totalmente por hidrólisis química. Esta característica hace que el PLA sea ampliamente utilizado para la producción de hilo para sutura, implantes, cápsulas para la liberación lenta de fármacos, prótesis, etc.

Entre los aspectos positivos del PLA se pueden destacar:

- Respetuoso con el medio ambiente: el PLA se obtiene a partir de maíz, caña de azúcar o remolacha que son fuentes renovables, es perfectamente reciclable, es biodegradable y, además, su producción consume dióxido de carbono.
- Procesabilidad: el PLA presenta buena procesabilidad, puede ser procesado mediante extrusión para posterior bobinado, por inyección, termo conformado, electro hilado e impresión 3D.

- **Compostabilidad:** el PLA experimenta la degradación biológica en condiciones industriales para producir agua, dióxido de carbono, compuestos inorgánicos y biomasa. Además, sin dejar residuos tóxicos. Sin embargo, no es compostable en compostadoras domésticas o locales que no puedan trabajar a temperaturas del orden de 60 °C y con adecuada dosificación de oxígeno, agua y microorganismos.
- **Bio-Compatibilidad:** desde un punto de vista biomédico, es un aspecto a tener en cuenta. Dentro del organismo, el PLA se hidroliza (liberando ácido láctico), por lo que los productos derivados de la degradación no son tóxicos en concentraciones moderadas. La Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) aprueba el primer stent reabsorbible para tratar las cardiopatías isquémicas fabricado con PLA. Además, también ha aprobado el uso de este material para la fabricación de envases y cubertería para estar en contacto con alimentos (FDA. U.S FOOD & DRUGS ADMINISTRATION, 2016).
- **Ahorro de energía:** la producción de plásticos tradicionales, derivados del petróleo, requiere la utilización de más energía. Concretamente, la producción de PLA requiere entre el 25 y el 55% menos de energía.

Por ser biodegradable y reabsorbible el PLA encuentra múltiples aplicaciones en medicina y en industrias como la alimentaria, la textil, de cosméticos y otras. Muchos de estos productos ya están utilizándose, pero otros aún están en fase de investigación en distintas etapas. En la literatura consultada se han encontrado referencias de los siguientes usos en diversos campos.

- **Médicos**

El ácido poliláctico se ha convertido en un producto importante en la industria médica. Al poder ser asimilado por el organismo, ha encontrado múltiples aplicaciones en cirugía, ortopedia, ortodoncia, oftalmología, traumatología y otras ramas de la medicina y como

soporte para el suministro controlado de numerosos medicamentos. (17) Los siguientes son algunos de los usos en este campo.

- Estructuras biodegradables para la ingeniería de tejido (18)
- Implantes reconstructivos y bioabsorbibles (19)
- Equipos e instrumental para cirujanos (20)
- Implantes para fijación de fracturas (21)
- Tratamiento de la lipoatrofia de la cara (22)
- Placas absorbibles para fijación interna en fracturas de cara, cirugía ortognática y craneofacial (23)

4.8 Las utilidades más destacadas del PLA son las siguientes:

4.8.1. Materiales de embalajes:

Los envases y empaques para alimentos y bebidas constituyen la aplicación más prometedora ya que mediante diversos estudios económicos se ha llegado a demostrar que el PLA es un material económicamente viable para utilizar como un envase de polímero. Además, debido al alto consumo de productos precocinados ayuda en gran medida a mitigar el impacto medio ambiental, ya que se trata de un material biodegradable. Incluso se ha llegado a demostrar que el empaquetado con PLA puede llegar a ahorrar un 30% con respecto al PET (Mariano, 2011). Existen 4 tipos de ácidos polilácticos en la industria del empaquetado y cada uno de ellos con características especiales (Zuluaga, 2013)

- 4041D: gran estabilidad hasta los 265°F (130°C)
- 4031D: también se utiliza a gran temperatura hasta 130°C
- 1100D: se utiliza para hacer tazones, las cajas de las patatas fritas, empaquetado de congelado vegetal.
- 2000D: se utiliza en envases transparentes de alimentos, para fabricar tazas, envases de leche. El PLA principalmente es utilizado como embalaje polimérico para productos de vida útil corta con aplicaciones comunes tales como botellas de agua, contenedores

(se consigue termoformado al PLA) de frutas y hortalizas, tazas desechables de helado y ensalada, láminas de envolturas de alimentos y envases en blíster (pastillas).



Figura 3: Ejemplos de envases y embalajes fabricados con PLA (Mariano, 2011).

4.8.2. En fibras

El PLA al ser tan humectante como el algodón, se ha visto como un sustituto de fibras sintéticas, por ello, la aplicación en la fabricación de prendas de vestir tales como camisas, vestidos, ropa interior etc.... (Ren, 2011). También se han elaborado trapos y toldos y cubiertas resistentes a la luz UV.

El hecho de emplear el PLA en la industria textil presenta una serie de ventajas (Ren, 2011):

- Bajo peso específico comparado con otras fibras naturales, lo que implica productos más ligeros.
- Una tenacidad más alta o lo que es lo mismo una fuerza extensible mayor que las fibras naturales.
- Resistencia UV excepcional comparado con otras fibras.

- Índice de refracción bajo, lo cual genera intensos colores una vez teñidas las fibras de PLA.
- Comparado con el PET y otros sintéticos, las fibras de PLA presentan bajo poder calorífico por lo que generan menor cantidad de humos al quemarse y una extensión más rápida de la humedad.
- Recuperación de la humedad perceptiblemente más baja con ello se hace un hueco en los tejidos de secado rápido. Sin embargo, también existen puntos débiles (Ren, 2011):
 - Baja resistencia a compuestos alcalinos, causando pérdida de fuerza en los convencionales procesos de dispersión por teñido.
 - Resisten temperaturas de planchado bajas puesto que presenta una temperatura cristalinidad baja.

4.8.3. Envases desechables:

Los establecimientos de comida rápida emplean una gran cantidad de productos desechables ya que suponen un bajo costo. Además, consiguen ahorrar el trabajo y los equipos empleados para el lavado de productos reutilizables y son perfectos para pedidos para llevar. Sin embargo, estos desechables se utilizan una sola vez y luego se desechan generando una gran cantidad de residuos nocivos no biodegradables que tardan en descomponerse cientos de años. La mejor solución contra este problema es desarrollar productos desechables hechos de materia prima renovable como el PLA.



Figura 4. Variedad de productos desechables que se pueden fabricar con PLA

4.9 Desventajas:

Al igual que el PLA tiene gran cantidad de ventajas, también se debe especificar los inconvenientes o desventajas de este material (Rojas, Rosales Castillo, González, Perera, & Trujillo, 2014):

- **Alta fragilidad:** el uso de PLA en aplicaciones que requieren deformación elástica es inusual ya que está sometido a altos niveles de estrés y podría sufrir deformaciones o rotura.
- **Reactividad deficiente:** el PLA es químicamente inerte. La modificación de las propiedades del polímero mediante tratamientos superficiales resulta bastante complicado a causa de baja reactividad.
- **Baja tasa de degradación:** los polímeros pueden sufrir degradación de tipo biótica o abiótica. El PLA sufre degradación abiótica de tipo hidrolítica, debida a la presencia de agua o humedad, rompiéndose sus enlaces de tipo éster. Este tipo de degradación depende fundamentalmente de varios factores del polímero como el peso molecular o cristalinidad. Este factor es importante para la utilización de este material con fines alimenticios o médicos.
- **Problemas térmicos en el procesado:** tras el procesado del PLA, este puede sufrir degradación termo-mecánica y termo-oxidativa, debido a la humedad, altas temperaturas, oxígeno y tiempos de exposición durante el procesado (tiempo de residencia en la extrusora).
- Además, hay que tener en cuenta que, en la actualidad, el PLA se produce a partir de productos alimenticios, como maíz o caña de azúcar, por lo que su producción consume un recurso que se podría emplear como alimento. Esto puede suponer un problema importante en algunos países en vías de desarrollo. Además, el cultivo de maíz o caña

lleva asociados sus propios consumos de agua, fertilizantes y energía, así como sus propias emisiones contaminantes.

La materia prima utilizada para la obtención de ácido láctico por fermentación debe contener una gran cantidad de carbono. Entre estos materiales destacamos la caña de azúcar, que puede estar en forma de glucosa, sacarosa o lactosa. También se pueden utilizar otras materias primas ricas en azúcares como son el almidón de maíz o la remolacha azucarera. El rendimiento del proceso de fermentación depende principalmente de la fuente de carbono que se haya elegido, pero también es importante la adecuada elección de los microorganismos para llevarla a cabo.

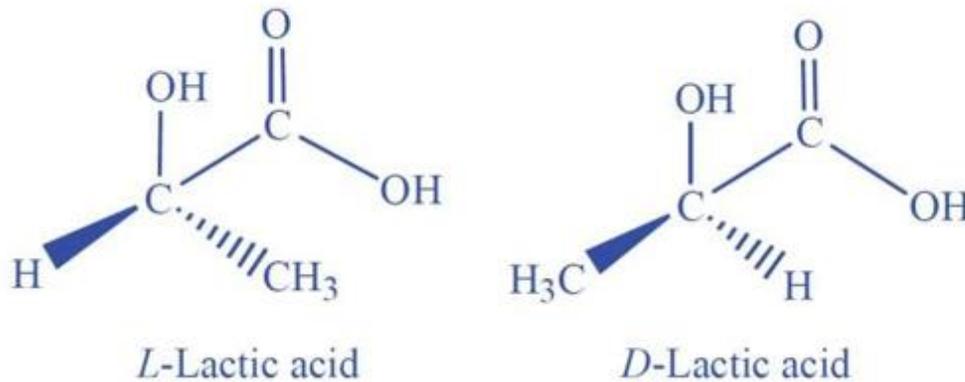


Figura 5: Estereoisómeros del ácido láctico (Lasprilla, y otros, 2010).

La materia prima utilizada para la obtención de ácido láctico por fermentación debe contener una gran cantidad de carbono. Entre estos materiales destacamos la caña de azúcar, que puede estar en forma de glucosa, sacarosa o lactosa. También se pueden utilizar otras materias primas ricas en azúcares como son el almidón de maíz o la remolacha azucarera. El rendimiento del proceso de fermentación depende principalmente de la fuente de carbono que se haya elegido, pero también es importante la adecuada elección de los microorganismos para llevarla a cabo. En la siguiente tabla, se muestran varios microorganismos/bacterias, la materia prima empleada y el rendimiento que se obtiene en cada caso para el proceso de fermentación

4.9.1 Reciclaje

Desecho de los materiales plásticos al ambiente provoca la disminución del embellecimiento de algunas áreas, establecimientos, pueblos y ciudades. Así mismo surge como problema asociado la contaminación ambiental, “muchas veces producto del desecho de los plásticos de alta y baja densidad. Actualmente estos plásticos son muy utilizados a nivel comercial como envases o envolturas, de sustancias o partículas alimenticias los cuales son desechados al medio ambiente luego de su utilización. Muchas de las ventajas de los productos plásticos se convierten en una desventaja en el momento que desechamos ya sea el envase porque es descartable o bien cuando tiramos objetos de plástico porque se han roto”.

Si bien los plásticos podrían ser reutilizados o reciclados en su gran mayoría, lo cierto es que los desechos son un problema de difícil solución, fundamentalmente en las grandes ciudades. Es realmente una tarea costosa y compleja para los municipios encargados de la recolección y disposición final de los residuos ya que a la cantidad de envases se le debe sumar el volumen que representan.

Por sus características los plásticos generan problemas en la recolección, traslado y disposición final. Algunos datos nos alertan sobre esto. Por ejemplo, “un camión con una capacidad para transportar 12 toneladas de desechos comunes, transportará apenas 6 o 15 toneladas de plásticos compactados, y apenas 2 de plástico sin compacta. Dentro del total de plásticos descartables que hoy van a la basura se destaca en los últimos años el aumento sostenido de los envases de PET, proveniente fundamentalmente de botellas descartables de aguas de mesa, aceites y bebidas alcohólicas y no alcohólicas”. De esta manera, resulta claro que el abandono de estos materiales al medio ambiente representa un grave problema ambiental y a la vez alterando el medio en el que vivimos cambiando el espacio del cual podemos disfrutar por un lugar al cual ya no se puede visitar.

La sustitución de los plásticos actuales por plásticos biodegradables es una vía por la cual el efecto contaminante de aquellos, se vería disminuido en el medio ambiente. Los desechos de plásticos biodegradables pueden ser tratados como desechos orgánicos y eliminarlos en los depósitos sanitarios, donde su degradación se realice en pequeños períodos de tiempo. El PLA, monómero natural producido por vías fermentativas a partir de elementos ricos en azúcares, celuloso y almidón, es polimerizado por el hombre. Los bioplásticos presentan propiedades fisicoquímicas y termoplásticas iguales a las de los polímeros fabricados a partir del petróleo, pero una vez depositados en condiciones favorables, se biodegradan, y regresan a la naturaleza sin dejar desechos contaminantes.

Al saber ahora, la gran problemática mundial que son los plásticos, derivados del petróleo, no solo por su constante daño al medio ambiente sino también por que proceden de fuente no renovables, nos justificamos queriendo dar una solución a esta situación proponiendo la fabricación de plásticos biodegradables a partir de materiales naturales. Ante esta perspectiva, las investigaciones que involucran a los plásticos obtenidos de otras fuentes han tomado un nuevo impulso y los biopolímeros como el PLA aparecen como una alternativa altamente prometedora. En conclusión, podemos afirmar que los beneficios sobrepasan por mucho a las desventajas y sabiendo que el cambio será difícil por diversos aspectos, se cree que es un paso que conviene a la mayoría de las personas que vivimos en el planeta. Las personas que controlan el mercado actual de productos derivados al petróleo, obedecen a sus propios intereses, es una situación que será difícil cambiar pero que es absolutamente necesario.

5. CAPITULO II

5.1 Cómo está aportando Colombia en el reciclaje de los polímeros (PLA).

PRINCIPALES FABRICANTES DE FILAMENTO PLA EN LA IMPRESIÓN 3D

Al ser uno de los materiales más populares dentro de la impresión 3D existen muchos fabricantes actualmente. Entre los más destacados encontramos a la empresa austriaca WeforYou, desarrollador de polímeros y soluciones sostenibles. La empresa alemana Evonik centrados en el desarrollo de PLA para el sector médico, la empresa estadounidense NaturaWorks gran productor de biopolímeros, y la empresa Corbion, con sede en los Países Bajos, centrada en el desarrollo de resinas de alto rendimiento con PLA.



Figura 6. Filamento de PLA reciclado.

El precio del filamento PLA actualmente puede variar dependiendo de los colores y características que se estén buscando. Los filamentos híbridos como el de madera, conductores, pueden ocasionar que el precio ascienda. En general, el precio de un filamento de uso doméstico se encuentra entre 68.000\$ el kilogramo. Existen igualmente

impresoras 3D capaces de fabricar con pellets, lo que reduciría drásticamente el precio del material.

En Colombia el reciclaje de PLA es un proceso circular en el cual se aprovechan los desechos para convertirlos en nuevos productos o en materia prima o insumos.

Juan Carlos Gutiérrez Cano, Gerente de EKO RED, Red Nacional de Economía Solidaria de Flujo Sustentable, sostuvo que, en Colombia, “se están enterrando anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reutilizar”. Esa afirmación hecha durante el seminario internacional Plástico de un solo uso: Desafío para todos que se llevó a cabo en Santa Marta, el mes pasado, va en línea con la Procuraduría General de la Nación, según la cual, cada colombiano usa dos kilos de plástico al mes, 24 kilos al año, lo que equivale a un millón de toneladas de año de plásticos del que solo se recicla un 7 por ciento mientras, “el 93 por ciento restante termina acumulado en los rellenos sanitarios o se arroja a las montañas, los valles, y los ríos”, señaló el Procurador General de la Nación, Fernando Carrillo, en el mismo auditorio. [29]

Los desechos para reciclar son numerosos; no hay disculpa, es necesario actuar y reciclar todos aquellos “residuos de envases y empaques de ventas primarios, secundarios o de único uso, entendidos como todo recipiente, embalajes o envolturas de papel, cartón, plástico, vidrio y metal puestos en el mercado nacional para servir como unidad de venta al consumidor final”, consigna la Resolución 1407 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

La misma norma excluye de procesos de reciclaje a los envases y empaques que correspondan a residuos peligrosos, restos de envases y empaques de madera y distintas al papel y cartón, y empaques y envases primarios de fármacos y medicamentos.

5.2 ¿Por qué es importante reciclar?

Existen defensores del plástico y sus bondades, no solo en cuanto a su utilidad y beneficios en todo tipo de campos e industrias, sino en términos que se extienden incluso al medioambiente, ya que la versatilidad, peso ligero y el bajo uso de materias primas, energía y agua que se requieren para su transformación contribuyen con el uso óptimo de los recursos, frente a la conversión de otro tipo de materiales, esto de acuerdo con Acoplásticos, asociación colombiana que agremia a empresas, organizaciones e instituciones que trabajan en la industria plástica.

Por lo tanto, la industria del plástico y los gobiernos de diferentes países se han puesto en la tarea de contribuir con la disminución de los índices de contaminación por este material. En Europa, Estados Unidos, México e incluso Colombia, se está avanzando en legislaciones para prohibir la utilización de plásticos de un solo uso para garantizar un proceso de reciclaje que le dé al material una segunda vida, o hasta más, en el caso de los envases de PET, adecuada con sus características particulares.

5.2.1 Plástico, la gran prioridad

El tema de la contaminación que generan los colombianos con el plástico, sigue siendo polémico y controversial. Colombia es un país con más de 45 millones de habitantes y se estima cada persona desecha dos kilogramos de plástico al mes, es decir, en este territorio se producen 24 kilos de basuras plásticas per cápita en un año.

Según datos de Efecto Rebote, una organización ambiental comprometida con el reciclaje en Colombia, 1 millón

de toneladas de plástico se generan en país, pero solamente el 7% es reciclado, una cifra muy mínima, ¿qué pasa con el 93% restante?, El Procurador General de la Nación, Fernando Carrillo habló sobre este sobrante: “El restante termina acumulado en los rellenos sanitarios o se arroja a las montañas, los valles, y los ríos”.

Según otro dato entregado por Efecto Rebote, no solamente se pueden reutilizar los plásticos en territorio nacional, también los envoltorios de papel, el cartón, el vidrio y ciertos metales.

5.3 Plástico en Colombia

Siguiendo esta línea, el sector plástico en el territorio nacional genera anualmente 1,2 millones de toneladas de residuos, los envases de gaseosas y agua representan el 56% del plástico que se genera a nivel nacional.

De lo anterior se desprende que en Colombia se fabrican 12 millones de botellas plásticas, de las cuales solamente 3 millones son recicladas.

Si bien es cierto que los objetos fabricados con plástico abarcan un gran espectro, son los envases plásticos que contienen bebidas –aguas, gaseosas, refrescos, maltas- el nicho que mayores y más firmes acciones requiere. En Colombia, el sector plástico genera 1,2 millones de toneladas por año, con ventas aproximadas de \$17 billones, entre materia prima y productos terminados. En estos últimos, los envases y empaques equivalen al 56 %, y los mezcladores, pitillos, platos, cubiertos y similares, son cerca del 3 %.

El plástico no tiene la culpa; los océanos de plástico en los mares son causados por la irresponsabilidad de los humanos que disponemos mal de estos envases.

El efecto rebote de los envases tirados al medio ambiente debe ser contrarrestado y el único camino real para lograrlo es disponiendo bien de ellos, comprando bebidas envasadas en botellas hechas con material reciclado (PET) y que se puedan reciclar, premiando a las marcas responsables, y presionando decisiones gubernamentales que hagan cumplir las normas.

El reciclaje de plásticos tiene el objetivo de minimizar su impacto en el medio ambiente y reducir el consumo de energía requerido para generar nuevos productos que se fabricarán a partir de plástico reciclado.

Los envases plásticos se pueden reciclar son aquellos que llevan en su parte inferior números de 1 al 6 dentro de un triángulo de flechas, el llamado círculo de Möbius, el símbolo internacional del reciclaje.

Estos números corresponden a un tipo de plástico determinado y están basados en el Código de Identificación Plástico con las siglas RIC (en inglés Resin Identification Code), norma impuesta en 1988 por la Sociedad de la Industria de Plásticos de Estados Unidos (Society of the Plastics Industry o SPI) y utilizada en muchos países.

Plásticos que se pueden reciclar:

- PET (Tereftalato de polietileno)
- HDPE (Polietileno de alta densidad)
- PVC (policloruro de vinilo)
- LDPE o PEBD (Polietileno de baja densidad)
- PP (Polipropileno)
- PS (Polipropileno)

Los empaques y envases que se usan para envasar productos químicos, farmacéuticos o insumos industriales son fabricados con otro tipo de polímeros como el Policarbonato o el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), entre otros, no son reciclables.

El PET sí es reciclable

Entre los plásticos reciclables sobresale el PET que, por sus condiciones de transparencia y alta resistencia, es utilizado, sobre todo, para envasar agua, bebidas/refrescos y otros productos alimenticios.

En Colombia los índices de reciclaje de PET son bajos. Se estima, según Acolplásticos, que de los 12 millones de botellas que salen al mercado a diario solo 3 millones se reciclan.

Empresas como Postobón y Coca Cola envasan en PET reciclado en categorías de gaseosas, aguas y bebidas hidratantes. Algunas de ellas buscan incrementar sus índices de PET reciclado. Postobón en la actualidad usa 46% de resina PET reciclada en sus envases, y tiene la meta de aumentar al 70% en 2024.

Coca Cola ha lanzado iniciativas como World Without Waste (Mundo sin residuos) La firma trabaja para que sus botellas sean 100 % reciclables, ya sea por medio del uso de más materia prima reciclada –hasta un 30 %– o de resinas a base de plantas, un objetivo de 100 % recolección y reciclaje a 2030. Además, pretende otras iniciativas como el aligeramiento de sus envases, para menor consumo energético en la fabricación y un reciclaje más óptimo, consigna en su página WEB

El plástico ámbar en Colombia se desperdicia, nadie lo recolecta porque nadie lo compra. Se va a la basura.

5.3.1 Hacerlo bien desde el principio

Para facilitar el reciclaje de envases se debe separar en fuente tapas y etiquetas de las botellas que, al ser de otros materiales, dificultan el reciclado.

A nivel doméstico, en bolsas aparte los plásticos, el papel y el cartón y lo orgánico, dispuestas en los puntos de recolección, es un gran avance. Los recicladores se encargarán de la disposición final.

Para espacios más grandes, los colores indicados para el correcto reciclaje son, el verde para vidrio y botellas; el azul para el cartón y papeles; el rojo para desechos peligrosos;

en el amarillo deben ir las latas y residuos plásticos; el naranja para lo orgánico y el gris para los demás desechos.

Una vez en los centros de acopio, las botellas son compactadas, trituradas, lavadas y fundidas para crear resina de PET reciclada. Esta resina reciclada se usa en la fabricación de nuevas botellas (en combinación con resina virgen), y en la elaboración de otros productos como fibra textil para ropa, tapetes y maletas, materiales de construcción, tuberías, esferos, gafas, mobiliario, piezas de automóviles y de electrodomésticos y envases de detergentes, entre otros muchos artículos.

5.4 Bondades del plástico

Existen defensores del plástico y sus bondades, no solo en cuanto a su utilidad y beneficios en todo tipo de campos e industrias, sino en términos que se extienden incluso al medioambiente, ya que la versatilidad, peso ligero y el bajo uso de materias primas, energía y agua que se requieren para su transformación contribuyen con el uso óptimo de los recursos, frente a la conversión de otro tipo de materiales, esto de acuerdo con Acoplásticos, asociación colombiana que agremia a empresas, organizaciones e instituciones que trabajan en la industria plástica.

Por lo tanto, la industria del plástico y los gobiernos de diferentes países se han puesto en la tarea de contribuir con la disminución de los índices de contaminación por este material. En Europa, Estados Unidos, México e incluso Colombia, se está avanzando en legislaciones para prohibir la utilización de plásticos de un solo uso o para garantizar un proceso de reciclaje que le dé al material una segunda vida –o hasta más, en el caso de los envases de PET–, adecuada con sus características particulares.

5.4 200 empresas de Bogotá reciclan y transforman cerca de 110 mil toneladas de plástico posconsumo al año

Bogotá, noviembre 25 de 2019 - Un estudio realizado por Acoplásticos y la Universidad Piloto de Colombia revela que 200 empresas recicladoras de plástico posconsumo de Bogotá transforman, en promedio, 9.000 toneladas por mes, lo que significa que, al año, estas empresas reciclan cerca de 110 mil toneladas de desechos plásticos.

“Estas reveladoras cifras demuestran que, en Colombia, el reciclaje de plásticos es un mercado más grande y sofisticado de lo que se piensa. Si sumamos estas 200 empresas, más las demás que se encuentran en Bogotá y en el resto del país que no se incluyeron en el estudio, encontramos un resultado muy alentador. Definitivamente, el reciclaje se proyecta como una solución real y tangible al desafío ambiental de los residuos plásticos, así como una gran oportunidad de empleo y desarrollo social para Colombia”, aseguró Daniel Mitchell, presidente de Acoplásticos. [1]



Figura 7. Cantidad de material transformado por empresas en toneladas mensuales

De las 200 empresas identificadas y encuestadas a través de visitas directas, 116 transforman el residuo plástico posconsumo hasta producto final (artículos de aseo, muebles, juguetes, envases, pisos, bolsas, mangueras, madera plástica, entre otros) y 84 hasta materia prima (gránulos, pellets y fibra para industria) que posteriormente es comercializada a industriales para fabricar nuevos productos.

5.4.1 Cantidad de material transformado por las empresas en toneladas mensuales

Este es el primer estudio en Colombia sobre el mercado del reciclaje en Bogotá, que además identificó que, de las 200 empresas, 104 compran el plástico posconsumo a sectores como cadenas de restaurantes, clínicas, comercializadoras, plazas de mercado y laboratorios; 90 empresas compran el material a recicladores de oficio y 8 empresas hacen recolección directa de los desechos plásticos. Ninguna empresa realiza importación de material reciclado para sus procesos de transformación [35].

En términos de infraestructura, el 24% de las empresas cuentan con más de una bodega propia para almacenamiento del material, en total, la capacidad de almacenamiento es de 49 mil toneladas aproximadamente. En cuanto a maquinaria, el 46,5% reporta de 2 a 3 máquinas para su proceso de transformación, el 16,5% de 4 a 6 máquinas y el 35% cuenta con una sola máquina para su proceso productivo. Así mismo, de las 200 empresas identificadas, más de 170 cuentan con sistematización de sus procesos de entrega, salida de material, clientes, insumos, entre otros, lo cual es un indicador del nivel de sofisticación y desarrollo gerencial de este sector.

5.5 Obstáculos y desafíos

Las empresas identificadas a través del estudio realizado por Acoplásticos señalaron que la falta de plástico reciclado de calidad en el mercado y la variación en los precios de compra y venta son las principales problemáticas del sector. A la pregunta relacionada con los requerimientos para aumentar la producción y competitividad, predominó la necesidad de contar con mayor capital para inversión, más materia prima recuperada de calidad, acceso a clientes, programas que permitan aumentar sus ventas y los elevados costos de energía.

Se concluye que este estudio nos demuestra que la economía circular de los plásticos es una realidad y que en Colombia se está avanzando en esta dirección. La capacidad instalada del reciclaje está creciendo y las tecnologías de aprovechamiento de residuos avanzan a grandes velocidades.”

5.6 Reciclaje de PLA en Colombia

Cincuenta años después de que se conociera el símbolo universal del reciclaje –el triángulo compuesto por tres flechas, como representación de un ciclo que no tiene fin– aún no logramos que estas tres simples acciones sean la regla de oro a la hora de disponer los residuos en los hogares colombianos.

De acuerdo con Superservicios, en el país se generan 11 millones de toneladas de residuos sólidos al año (2017). Sin embargo, solo se recuperan cerca de un millón de toneladas, de las que el 10%, es decir, cerca de 94.500 corresponden a materiales plásticos.

Pero este panorama puede cambiar. Aunque el reciclaje requiere de una logística compleja y de tecnología especializada, depende fundamentalmente de las decisiones que tomemos a la hora de disponer los residuos en casa.

Si no se separa correctamente, los materiales se contaminan, lo que impide que se reincorporen en la cadena de reciclaje, y terminan en rellenos sanitarios, donde les toma años descomponerse –incluso siglos–, o en la naturaleza.

Si se separa, limpia y secan los residuos, el reciclador de oficio o gestor privado, podrá seleccionar y transportar los materiales hasta los centros de acopio. Allí, el material es separado y almacenado en bodegas.

El PLA, por ejemplo, es un material complejo para la separación, porque existen diversos tipos y colores, por lo cual requiere un proceso de pre-transformación, en el que se lava, seca y muele o aglutina.

El material que se obtiene en este proceso, se incorpora en nuevos materiales para la elaboración de nuevo plástico. Después de esta transformación, las empresas compran el material para fabricar nuevos productos y venderlos en el mercado.

ACOPLÁSTICOS presenta la décima edición del Directorio Colombiano de Reciclaje de PLA 2021-2022, herramienta valiosa para todos los actores involucrados con el manejo de los citados residuos, facilitando su relacionamiento e interacción, además de ser un medio que busca informar y educar a los diferentes actores acerca del reciclaje, contribuyendo además al desarrollo de iniciativas de la ciudadanía y las empresas.

En la edición 2021-2022 del Directorio Colombiano de Reciclaje de Residuos Plásticos, se incluye una nueva sección dedicada a visibilizar las nuevas tecnologías y procesos alternativos para el aprovechamiento de residuos plásticos. Esta edición cuenta con los siguientes grupos de empresas:

- Empresas que realizan recolección, compra, selección, clasificación, empaque, transporte o comercialización de residuos plásticos.
- Empresas que adquieren residuos plásticos seleccionados y clasificados para transformar en materia prima recuperada y/o prestan servicios a terceros.
- Empresas que utilizan materia prima plástica recuperada para fabricación de bienes.
- Empresas que utilizan residuos plásticos seleccionados y clasificados para realizar procesos de aprovechamiento alternativos.
- Empresas proveedoras de maquinaria para el reciclaje de residuos plásticos.
- El Directorio también dispone de información relacionada con las importaciones y exportaciones colombianas de desechos y desperdicios de plástico, realizadas en el período 2019-2021.

Adicionalmente, cuenta con una sección sobre la caracterización de los plásticos para identificar la resina de la cual está hecho un producto y un breve listado de productos fabricados con cada una de las diferentes resinas. Así como, el instructivo de la construcción gráfica del logo y codificación de las resinas plásticas.

5.7 Lo difícil de reciclar PLA

La difícil degradación de este material plantea desafíos ecológicos en todo el planeta. Aunque su impacto medioambiental ha obligado a todos los países a buscar alternativas para aumentar el reciclaje y reducir los residuos, parece que todavía falta mucho para poder prescindir de él completamente. Estos datos permiten hacerse una idea del enorme problema que suponen estos residuos a nivel ambiental.

- Cada minuto, se vende un millón de botellas de plástico en todo el mundo.
- Cada botella de plástico tarda unos 450 años en descomponerse. Si no está a la intemperie, la cifra se aproxima a los 1.000 años.
- Más del 90% de los plásticos del mundo se producen a partir de combustibles fósiles.
- El 42% del plástico utilizado en el mundo se destina al empaquetado de alimentos y productos manufacturados. Es decir, plásticos de un solo uso que apenas pasan unos minutos en las manos de los consumidores.
- Desde el año 2006, el reciclaje de residuos plásticos se ha duplicado en Europa.
- A pesar de la mejora de los datos del reciclaje de plásticos en Europa, el 25% de estos desechos todavía es arrojado a los vertederos.
- En 2018, la producción global de plásticos fue de 359 millones de toneladas, un peso similar al aproximado de la población mundial.
- España es el cuarto productor de plástico de la Unión Europea y, según Greenpeace, solo el 30% de los plásticos se reciclan en el país.
- China produjo en 2018 en torno al 30% de los plásticos de todo el planeta.
- 8 millones de toneladas de residuos plásticos acaban en los océanos cada año. Llegan por vía fluvial y se concentran en los grandes ríos del mundo y sus principales afluentes.
- Si los datos se mantienen, los océanos contendrían más plástico que peces en 2050 según datos de la ONU.
- En 2017, el río Yangtze transportó 1.469.481 toneladas de plástico al mar.

- De todos los residuos plásticos que llegan al mar por los ríos, el 86% se concentra en Asia, seguido por África con un 7.8%.
- Un estudio elaborado por el Center for International Environmental Law (CIEL) estima que, en 2019, la polución resultante de la producción global de plásticos y su posterior incineración sería igual a las emisiones de 189 centrales eléctricas a carbón.
- En 2015, el 55% de los residuos plásticos globales eran desechados.
- Si las tendencias no cambian, en 2025 China, India e Indonesia sumarán el 40% de los residuos plásticos mal gestionados del mundo.
- El comercio entre desechos plásticos también existe. China importó en 2016 el 60% del total de desechos plásticos comercializados del mundo.
- Hasta entonces, los principales exportadores de residuos plásticos a China eran Hong Kong, Estados Unidos, Japón, Alemania y el Reino Unido. Hong Kong actuaba como intermediario para muchos países, de ahí su posición en la lista.
- Tras la entrada en vigor de las restricciones en la política china de gestión de residuos, la cantidad de desechos plásticos importados desde Europa y Estados Unidos se redujo en 10 veces.
- Si se suma la producción de plástico durante toda la historia, en el año 2015 el mundo ya había producido 7.800 millones de toneladas de plástico, más de una tonelada de plástico por persona en el mundo.

5.7.1 Proceso para reciclar PLA

-Depósito de envases en el contenedor correspondiente. Este es, sin duda, el primer paso para poder seguir impulsando la lucha contra el plástico a través del reciclaje. Para ello, es fundamental la labor ciudadana y de las empresas. Pero, ¿qué se puede introducir en este contenedor para reciclar? Envases de plástico (como por ejemplo botellas de suavizante), envases metálicos (como las latas de conservas) y tetrabriks (como los de la leche o el zumo). También es posible depositar las bandejas de corcho.

-Recogida y traslado a la planta de selección. Todos los envases introducidos en este contenedor son trasladados a una planta, donde se procede a seleccionar los materiales y se clasifican por colores.

-Trituración y lavado. Una vez hecha la selección, los envases se trituran y se lavan para eliminar las impurezas. Una vez realizado este paso, se procede al secado y centrifugado de los mismos con el objetivo de eliminar posibles restos que hayan quedado y se homogeneiza con un proceso mecánico para lograr un color y textura uniforme.

-Generación de un nuevo envase o producto. Tras una nueva depuración del material, el plástico ya estaría listo para darle una nueva forma y color según la demanda, pasando posteriormente por los controles de calidad pertinentes.

5.8 Convertir restos de impresión 3D en nuevo material de impresión

Si lo que se quiere es que el material sobrante de las impresiones 3D vuelva a convertirse de nuevo en material que puedas imprimir, actualmente existen tres maneras de hacerlo: Crear nuestro propio filamento, usar una extrusora especial que nos permita imprimir usando directamente trozos de plástico reciclado o comprar bobinas de filamento fabricadas a partir de material reciclado.

5.8.1 Crear un propio filamento

Para crear un propio filamento utilizando los restos de otras impresiones 3D existen varios proyectos de máquinas conocidas como extrusoras de filamento. Cada una de estas máquinas funciona de manera ligeramente distinta, pero, básicamente, se alimentan de restos triturados de impresiones 3D y los funden, extruyendo filamento nuevo a través de una boquilla de 1.75mm de diámetro.

5.8.2 ¿Qué alternativas existen?

Existen numerosas maneras en las que se puede reciclar este plástico.

Las dos principales alternativas que tenemos son: reciclar el plástico de nuestras impresiones para convertirlo de nuevo en material que podamos imprimir o utilizarlo para fabricar objetos plásticos usando otras tecnologías como la inyección de molde.

5.9 MODELO A SEGUIR EN COLOMBIA

5.9.1. RECOGIDA DE PLA

El material que se recicla son diferentes piezas defectuosas procedentes de la fabricación de pantallas protectoras fabricadas por los coronamakers durante la pandemia de COVID-19. El material recibido son desechos de impresiones 3D fallidas (figura XX), por lo que, se tendrán que estudiar para ver si es PLA con toda seguridad y no otro tipo de plástico utilizado en esta metodología de fabricación.



Figura 8: Desechos de PLA producidos por coronamakers.

Además, en este proyecto se estudian dos tipos de PLA virgen, un PLA de base de Ingeo, disponible en forma de granza y otro comprado en forma de bobina para su futura impresión 3D.

Para la comprobación de si el material recogido es puro se utiliza la técnica de ATR. Para ello se necesita el espectro IR de PLA virgen fabricado en la escuela, se procede a estudiar cada muestra y comprobar que la huella de ambas es prácticamente igual. Como resultado obtenemos que todas las muestras tienen huellas similares, con alguna diferencia que se explicará posteriormente.

Para futuras técnicas de caracterización necesitaremos aproximadamente, como mínimo, unos 16 g de cada muestra. Esta cantidad es aproximada ya que durante los procesos de lavado o triturado se puede perder pequeñas cantidades de material; siempre interesará poder tener la máxima cantidad de material.

- Equipo de limpieza. Uno de los pasos más importantes a la hora de realizar correctamente este proceso es asegurarse de que el material, que va a ser procesado, esté libre de impurezas y de cualquier tipo de sustancias nocivas.

5.9.2 Materiales utilizados en el proceso de limpieza

Los materiales utilizados en este proceso de limpieza son:

- Vaso de precipitados de 2L.
- Calentador con agitador magnético.
- 1,5L de agua.
- 15g de NaOH.
- 4,5 g de Tritón X-100 (tensoactivo).

El proceso de lavado ha sido explicado con anterioridad en el apartado de reciclado mecánico. A continuación, se muestra una imagen de lavado de PLA a 85°C durante 15 minutos (figura 9).



Figura 9: Lavado de PLA.

5.9.2.1. Equipo de secado.

El proceso de secado tiene una gran importancia previa al proceso de extrusión. El PLA es un poliéster alifático, el grupo éster se hidroliza en presencia de agua que ha sido introducida en el proceso de limpieza, además, es térmicamente inestable, por lo que sufre diversas reacciones diferentes de ruptura aleatoria de cadenas a causa de su tratamiento a temperaturas en torno a la temperatura de fusión. Para poder evitar el efecto de la hidrólisis el PLA debe ser introducido en la secadora con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de humedad.

Se va a utilizar una estufa de vacío que operará a 40 °C durante 2 horas después de ser lavado y 1 día de reposo previo a la extrusión. Esta estufa está diseñada

para reducir al máximo cualquier complicación de humedad que pueda ocurrir durante el procesado del polímero y asegurar un secado de manera uniforme en todo el material.

5.9.2.2. Equipo de triturado.

La introducción de PLA en la última fase del proceso, la extrusión, requiere que el PLA tenga las características físicas adecuadas para su correcto funcionamiento. Para ello,

se necesita convertir las piezas que se recojan, o los hilos bobinados que hayan quedado sin utilización, en pequeños gránulos que se puedan introducir en la tolva de la extrusora. Este proceso se lleva a cabo gracias a la trituradora.

A causa de la pandemia COVID-19 no se pudo montar la máquina de trituración con la suficiente antelación, por ello, este proceso se llevó a cabo a mano. El proceso de trituración en pequeños gránulos se realizó con unas tijeras especiales para cortar plástico. En la figura 29 se muestra cómo fue el resultado de la trituración manual.



Figura 10: Muestras de PLA triturado

5.9.2.3. Equipo de extrusión y bobinado.

La extrusión y bobinado del PLAR se dan en la última fase del proceso. El PLAR, previamente triturado y convertido en gránulos, se introduce en la tolva de la extrusora. La máquina que se va a utilizar consta de una extrusora horizontal que garantiza la redondez precisa y guía con precisión el filamento al carrete. El modelo utilizado es Rondol Microlab Twin Screw, consta de dos husillos paralelos de 10 mm de diámetro (figura 30) y girando a 60 rpm. Se utiliza esta extrusora porque, debido a la pandemia COVID-19, no se pudo montar la extrusora bobinadora monohusillo con la suficiente antelación. Los resultados obtenidos con la extrusora de doble husillo son perfectamente

válidos, ya que es conocido que las extrusoras monohusillo degradan menos el material que las de doble husillo.



Figura 11: Extrusora de doble husillo abierta. Disposición de los husillos.



Figura 12: Proceso de extrusión.

El proceso de extrusión (figura 12) se debe realizar con total precaución, por ello los husillos, la tolva, la zona de fusión y la placa rompedora tienen que estar limpias y libres de impurezas. Para ello, se realiza una primera vez el proceso con PLA “de limpieza” para así homogeneizar el equipo.

A continuación, se muestra un esquema de una extrusora monohusillo (figura 13), como la que se ha adquirido y se utilizará finalmente, donde se representa cada una de las zonas de la extrusora.

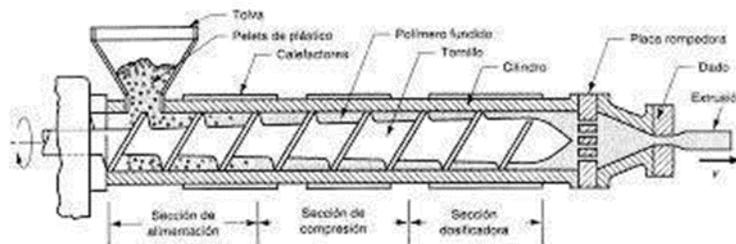


Figura 13: Esquema de extrusora horizontal.

6. TRES ZONAS POR LAS QUE PASARÁ EL PLÁSTICO RECICLADO

- Sección de alimentación: el material se mueve desde la puerta de la tolva y se precalienta.
- Sección de compresión: el polímero adquiere una consistencia líquida por el aumento de la temperatura, el aire atrapado entre los gránulos se extrae de la fusión y el material se comprime.
- Sección dosificadora: en la cual se homogeniza la fusión y se desarrolla suficiente presión para bombearla a través del orificio de la boquilla.

Una vez el polímero sale de esta última sección se encuentra con el filtro y la placa rompedora, cuya función es eliminar las impurezas del proceso, acumular presión para poder bombear el plástico hacia un posible molde y, por último, hacer olvidar el movimiento rotatorio con el que el plástico sale del husillo de extrusión.

La extrusión es un tratamiento térmico, el perfil de temperaturas a lo largo de todo el procedimiento es un factor a tener muy en cuenta a la hora de realizar el proceso. En función de las características de la máquina y el producto que se vaya a extruir los perfiles

irán variando. En este caso, en la figura 14 se muestra el perfil de temperaturas de la extrusora por zonas, al igual que la presión durante el proceso y la velocidad del motor.



Figura 14: Perfil de temperaturas de la extrusora.

6.2 Obtención de filmes.

Para realizar la caracterización de las diferentes muestras, para cumplir el objetivo de este proyecto, se deben obtener los filmes de PLA a estudiar. Estos filmes se utilizarán por ejemplo para medir el color y las propiedades térmicas y mecánicas de cada material. Se realiza mediante una prensa hidráulica de platos calientes modelo PL-15 (figura 15). Esta prensa consta de tres espaciadores de 210 μm , para controlar el espesor, y unos moldes de latón recubiertos por láminas de poliimida para facilitar y mejorar el desmoldeado. De cada muestra que se quiere realizar se necesitarán aproximadamente 2 g de material.

6.1.1 Los pasos que se llevan a cabo son los siguientes:

- El molde es colocado en los platos de la prensa, esta está a una temperatura de 180 °C, ya que el material se debe fundir. Estará un tiempo aproximado de 5 minutos.
- Se aplica una presión entre 15 y 19 MPa durante 20 segundos para la desgasificación, se repite este proceso durante 2 minutos.
- El molde se deposita sobre los platos fríos de la prensa durante 5 minutos con una presión similar a la del paso anterior.
- El film es extraído de los moldes.

Después del proceso se deben limpiar los moldes y las películas de poliimida con acetona para eliminar cualquier resto que haya podido quedar. Los filmes deben ser almacenados en una secadora de vacío para así evitar que cojan humedad.



Figura 15: Prensa hidráulica de platos calientes.

6.1.2. Espectrofotómetro FTIR-ATR

Esta metodología se utiliza con dos fines en este proyecto. En primer lugar, se utiliza para determinar la estructura química de los residuos y, por otro lado, esta técnica es usada para cuantificar las diferencias en la estructura de las diferentes muestras obtenidas. La técnica utilizada es ATR (Attenuated Total Reflection), que mide los

cambios de luz producidos en un haz de infrarrojos al contactar con la muestra. El equipo empleado es un Nicolet iS10, se muestra en la figura 16. La técnica efectuará 16 barridos con una resolución de 4 cm^{-1} .

6.1.3. Espectrofotómetro FTIR-ATR

Esta metodología se utiliza con dos fines en este proyecto. En primer lugar, se utiliza para determinar la estructura química de los residuos y, por otro lado, esta técnica es usada para cuantificar las diferencias en la estructura de las diferentes muestras obtenidas. La técnica utilizada es ATR (Attenuated Total Reflection), que mide los cambios de luz producidos en un haz de infrarrojos al contactar con la muestra. El equipo empleado es un Nicolet iS10, se muestra en la figura 35. La técnica efectuará 16 barridos con una resolución de 4 cm^{-1} .



Figura 16: Espectrofotómetro infrarrojo Nicolet iS10.

6.1.4. Calorímetro diferencial de barrido (DSC).

El equipo empleado en esta técnica es un calorímetro TA Q-20 (figura 17). El proceso se realiza en dos barridos. Primero un calentamiento desde 30°C hasta 180°C con una velocidad 5°C/min, después se estabiliza durante 3 minutos a una temperatura de 180°C para borrar la historia térmica de la muestra. En el segundo barrido se enfría la

muestra hasta 0°C con la misma velocidad de antes, se mantiene 1 minuto en equilibrio y, por último, se vuelve a calentar hasta 180°C.

La muestra que se estudia es de unos 4,5 mg que se deposita en una cápsula de aluminio. De esta manera se compara con otra cápsula vacía, y se obtienen resultados del flujo que pasa a través de ambas cápsulas.



Figura 17: Calorímetro TA Q-20.

6.1.5 Termobalanza (TGA).

Esta técnica se realiza con una termobalanza TGA 2050 de TA Instruments (figura 18). El ensayo que se ha realizado tiene unas condiciones que van desde una temperatura ambiente hasta 800 °C, la velocidad está fijada en 10 °C/min. Este análisis se hace en una atmósfera inerte de nitrógeno con un caudal de 30 mL/min, del cual se utilizan 25 mL para el horno y 5 mL para la balanza. Las muestras deben tener una masa de entre 8 y 10 mg, que se depositarán en un crisol de platino previamente tarado en la balanza.



Figura 18: Termobalanza TGA 2050.

6.1.6. Viscosimetría.

Como ya se ha comentado, en este proyecto se va a calcular la viscosidad intrínseca del PLA. Para ello, se utiliza un viscosímetro Ubbelodhe sumergido en un baño termostático a 25°C (figura 19). Es importante mantener la temperatura a 25°C ya que los coeficientes de la ecuación Mark-Houwink-Sakurada vienen dados a esa temperatura. El diluyente que se emplea es el cloroformo.

El procedimiento que se ha seguido para realizar las medidas ha sido el siguiente:

1. Medida del tiempo para cloroformo puro.
2. Medida del tiempo para la disolución madre, se emplean 10 ml ($C_1=0,25/25$ g/ml).
3. Medida del tiempo tras añadir 3 ml a C_1 ($C_2=C_1 \cdot 10/13$ g/ml).
4. Medida del tiempo tras añadir otros 3ml ($C_3=C_1 \cdot 10/16$ g/ml).
5. Medida del tiempo tras añadir otros 4 ml ($C_4=C_1 \cdot 10/20$ g/ml).



Figura 19: Montaje para la determinación de la viscosidad intrínseca del PLA.

6.1.7. Espectrofotómetro para análisis de color

En esta técnica se emplea un espectrofotómetro Minolta CM-3600d (figura 20), el método utilizado es el de transmitancia. Se toma al aire como medio estándar para calibrar el instrumento de medida. Posteriormente, se toman datos de las diferentes muestras a analizar.



Figura 20: Espectrofotómetro Minolta CM-3600d.

Implementación de idea de negocio para reciclar PLA en Colombia

6.2 Idea de negocio.

Este proyecto se basa en una instalación industrial orientada a tratar residuos para reinsertarlos en la economía. Se trata de un sistema cuya principal idea es el concepto de economía circular. Se mezclan, de este modo, intereses económicos y medioambientales, que deberán ser abarcados por la institución. El proyecto se centra en la recolección, tratamiento y estudio de PLA para la obtención de PLAR (reciclado) que pueda ser utilizado posteriormente para la fabricación de diferentes productos mediante la impresión 3D.

Una vez analizado el contexto, las implicaciones y, sobre todo, las expectativas depositadas en este cambio de modelo, se desarrolla el principal objetivo de la economía circular, que es proteger el medio ambiente y garantizar la salud de las personas reduciendo el uso de recursos naturales no renovables y reutilizando en el ciclo de producción los materiales contenidos en los residuos como materias primas secundarias. Se busca impulsar el análisis del ciclo de vida de los productos y la incorporación de criterios de eco-diseño, reduciendo la introducción de sustancias nocivas en su fabricación facilitando la reparabilidad de los bienes producidos, prolongando su vida útil y posibilitando su valorización al final de ésta. Se pretende favorecer la aplicación efectiva del principio de jerarquía de los residuos, promoviendo la prevención de su generación, fomentando la reutilización y fortaleciendo el reciclado.

Por otro lado, esta economía pretende promover pautas que incrementen la innovación y la eficiencia global de los procesos productivos, mediante la adopción de medidas como la implantación de sistemas de gestión ambiental. Implantar un modelo de consumo responsable, basado en la transparencia de la información sobre las características de los bienes y servicios, su duración y eficiencia energética, mediante el empleo de medidas como el uso de la eco-etiqueta.

A la hora de definir un proyecto, se deben establecer unos objetivos claros que marquen y orienten las principales líneas de actuación. Estos objetivos ya han sido especificados

anteriormente, pero podemos destacar como objetivo principal el compromiso medioambiental del proyecto.

En cuanto al objetivo económico, como toda institución o empresa, se busca obtener los máximos beneficios. Posteriormente, se estudiarán precios y costes de materias primas y máquinas a utilizar y se intentará sacar el mayor beneficio posible sin olvidarse del propósito de alcanzar una alta rentabilidad y competitividad.

Como ya se ha mencionado no se debe olvidar que el principal objetivo es seguir el modelo de economía circular, por lo que también debe haber un objetivo ambiental en la recogida de materia prima en los diferentes departamentos.

6.3. Descripción del mercado.

El necesario hecho de rebajar la contaminación producida por los plásticos unido al crecimiento en el sector de soluciones de reciclaje de estos y al sector de creación de plásticos biodegradables, sitúan a este proyecto en un punto clave en el mercado ya que es el nexo perfecto entre la utilización de bioplásticos y su posterior reciclado.

La idea de este proyecto no va más allá de su aplicación en la ETSII por lo que la competencia de otras empresas dedicadas a este sector no es precisa de estudio. Se cuenta con la ventaja de ser una institución relativamente pequeña, pero con la suficiente capacidad para poder producir la materia necesaria para llevar a cabo el proyecto. Otra ventaja a destacar es la experiencia en el sector del reciclado y del tratamiento de plásticos, gracias a los laboratorios con los que cuenta la universidad, este proyecto se podrá llevar a funcionamiento con las mejores máquinas y profesionales posibles.

6.4. Segmentos de clientes.

Uno de los posibles finales a los que se destinaría el PLAR, es a la creación, mediante impresión 3D, de algún tipo de producto para su posterior venta o distribución entre los alumnos de la universidad o los departamentos. Esta propuesta es de gran interés, ya

que por parte de la institución y de los clientes, se centra en la mejora del medioambiente y la sostenibilidad, reduciendo la contaminación y el impacto ambiental de las actividades en la universidad.

6.5. Descripción del producto en relación con sustitutos y proveedores.

Como ya se ha expuesto, la principal función del proyecto no es otra que reciclar el PLA utilizado y medir sus propiedades para ver si su futura utilización es viable tanto económicamente como técnicamente.

Para ello se ha de conseguir la materia prima y se necesitará realizar una colaboración con los departamentos y asociaciones de la universidad. Por otra parte, contactar con los productores de PLA a los que se le compra la materia y con la empresa en la que se han adquirido las máquinas necesarias.

Aunque es un proyecto de dimensiones pequeñas los principales sustitutos pueden ser empresas dedicadas al sector del reciclaje que den beneficios a aquellos clientes que aporten materia prima ya utilizada. Esto de facto acarrearía que el proyecto se quedaría sin aportación de PLA y, por lo tanto, su inutilidad.

Para combatir esto último, se tiene que crear una red de clientes y una serie de medidas que hagan que esto no saliese rentable a ninguna empresa exterior. Con la intención de combatir este posible escenario, en el caso de que ocurra, se debe actuar de manera que la experiencia y la iniciativa de este proyecto sirvan como valor por encima de las propuestas ofertadas por otras empresas que pudieran plantear competencia.

6.6. Análisis DAFO.

El análisis DAFO consiste en enfocar el estudio desde dos puntos de vista distintos, un estudio interno (Debilidades y Fortalezas) y otro externo (Amenazas y Oportunidades). En el análisis interno se tienen en consideración las posibles ventajas y desventajas de la propia empresa frente a los competidores, mientras que en el externo se intenta

conseguir un conocimiento global del mercado, obteniendo los distintos condicionantes para cualquier empresa que opere en dicho sector, y en consecuencia aprovechar las posibles situaciones ventajosas que se presenten.

La debilidad más evidente del proyecto es la falta de experiencia dentro del sector, con la consecuente dificultad para poder asentarse como referencia en este. Otro factor de riesgo es la gran dependencia de colaboración, tanto ciudadana como a nivel institucional, ya que es necesario recolectar cierta cantidad de PLA para poder lograr la producción deseada. Al ser una empresa nueva y de capacidad reducida, la falta de diversificación en las líneas de producción puede suponer un riesgo a medio y largo plazo a tener en cuenta al dedicar la inversión de forma íntegra a la obtención de una gama de productos limitados.

Una de las mayores ventajas de este proyecto es que se basa en un proceso de economía circular. En una sociedad cada vez más consciente de los grandes problemas que acarrea la contaminación, se propone un producto fabricado con plástico obtenido de desechos producidos por la propia Universidad. Esto supone dos puntos favorables:

- Al presentar una forma novedosa y pionera en el ámbito universitario de obtener plástico, el producto se ve diferenciado del resto de fabricantes del sector, pudiendo atraer a posibles clientes que quieran beneficiarse de la buena imagen de cara al público que supone una producción que colabora con el cuidado del medio ambiente.
- La recolección de PLA necesaria para la producción abre la posibilidad de recibir subvenciones por parte de instituciones y empresas interesadas en colaborar con el proyecto.

Con estas características se pretende compensar la falta de experiencia expuesta previamente, intentando transmitir una imagen renovadora y que puede potenciar el crecimiento del sector en general.

El proceso productivo está libre de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, evitando así posibles adaptaciones a cambios obligados por la regulación vigente respecto a la contaminación en la industria.

Posiblemente la mayor amenaza que presenta el sector para la incorporación de nuevas empresas es la presencia de grandes corporaciones que ostentan una posición muy cómoda en cuanto a cuota de mercado.

Las ventas en este sector no están destinadas a particulares, sino a otras empresas que quieran utilizar el producto como punto de partida para generar los suyos propios, por lo que normalmente serán requeridos lotes de grandes cantidades de producto, lo que favorece a empresas con capacidad para obtener enormes volúmenes de producción con relativa facilidad. La foto corresponde a un ranking llevado a cabo por El Economista en 2016 donde se evidencia la existencia de empresas con facturaciones muy altas, y por lo tanto con una posición asentada dentro del sector.

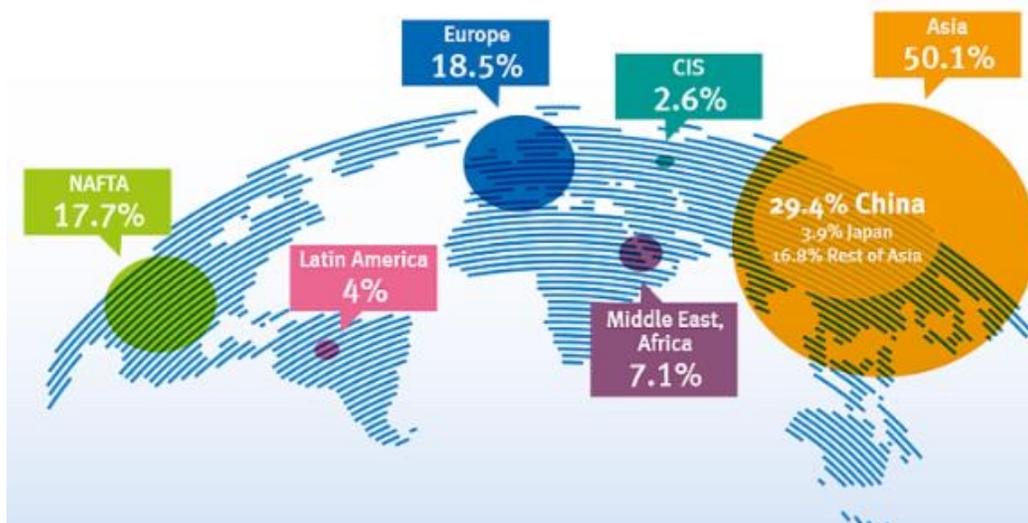


Figura 21. Ranking de Empresas del sector Fabricación de plásticos en formas primarias (El Economista, 2016).

Otra amenaza, no solo para el entorno más directo, sino para toda la industria está relacionada con lo anterior, ya que la incertidumbre política actual respecto a posibles

cambios en la regulación de las empresas puede llevar a las directivas a ser más comedidas en sus estrategias comerciales para evitar riesgos, dando prioridad a proveedores de confianza ya establecida y evitando apostar por nuevas empresas en desarrollo, lo que llevaría a tardar más tiempo del quizás esperado obtener una buena cuota de mercado.

La complicación para obtener una buena cuota de mercado se puede ver compensada por las características del producto tratado. La variedad de productos hechos de plástico es ilimitada, por lo que la necesidad de proveedores de plástico es constante, lo que da estabilidad al sector frente a posibles épocas de crisis o de disminución del consumo.

Otra ventaja derivada del producto es su sencillez, al ser muy genérico no tiene sustitutivos directos, reforzando la estabilidad ya comentada. El crecimiento del interés en el mantenimiento del medio ambiente y la lucha contra el cambio climático por instituciones internacionales como la ONU da lugar a una actitud proactiva de organizaciones como la UE y los distintos estados que la conforman para apoyar las iniciativas que colaboren en estos temas.

7. CAPITULO III

Debido a que en Colombia aún no se evidencian empresas en las cuales se recicle PLA generado de impresión 3D se plantea una oferta la cual ha tenido éxito en Europa.

7.1 Análisis económico

El análisis económico del proceso de producción y reciclado es esencial para conocer si la viabilidad económica de realización es positiva y, por lo tanto, se puede llevar a cabo. En este apartado se estudiará la inversión, financiación, rentabilidad y la estructura de ingresos y costes para desarrollar la viabilidad económica a partir de parámetros como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el plazo de recuperación.

En apartados anteriores se ha comentado que este proyecto busca el beneficio económico para la ETSII. No se trata de construir una planta industrial, sino de una pequeña instalación de reciclaje mecánico de PLA utilizando máquinas existentes en la Escuela.

Para determinar los parámetros mencionados se procederá a definir y determinar los ingresos asociados al proceso de producción, los costes que este requiere y los flujos de caja finales. El cálculo de los equipos que se requieran en el proceso se estimará mediante el método de Guthrie.

7.2 Caracterización de la inversión

Es necesario realizar la caracterización de la inversión para así, posteriormente, calcular los parámetros mencionados. Esto comprende:

7.2.1 Inmovilización de recursos:

Es el capital que el proyecto requiere para su comienzo. Este capital engloba partes como las aportaciones de capital circulante, la adquisición de activos fijos y los gastos que requiere la inversión.

7.2.2 Flujos de caja de las operaciones

Se tienen en cuenta las entradas (ventas, ahorros, posibles subvenciones, etc.) y las salidas de dinero (costes fijos, costes variables, impuestos, etc.).

- Recuperación de las inversiones: este concepto incluye todas las plusvalías o minusvalías en el caso de que se llevarán a cabo ventas de activos fijos, recuperación del capital circulante y valores residuales.

7.3 Inmovilización de los recursos

El primer valor que debemos determinar es el desembolso inicial que se debe realizar, constituido por el coste total de la instalación y el posible coste del terreno. El coste total de la planta se determinará mediante el método de Chilton con los costes de los equipos.

En este proyecto debemos considerar unos costes de terreno equivalentes a 2.500 €, ya que se piensa comprar una pequeña caseta para montar la planta de reciclaje con toda la maquinaria requerida. Esta caseta no se utilizará únicamente para este proyecto, sino que contará con la participación de otros proyectos llevados a cabo por CircularizETSII. Al igual que más tarde se estimará la parte equivalente de los equipos para este proyecto, solo se contabilizará la mitad del coste de adquisición del terreno.

El desembolso inicial que se calcule deberá ser sumado al capital circulante para así obtener el resultado final de la inmovilización de recursos.

7.4 Costos de los equipos

Guthrie publicó en 1969 un método para realizar el cálculo del coste de los equipos principales utilizados en procesos químicos. El método comienza con la estimación de un costo base en función de alguna dimensión del equipo. Se estudian varios elementos como el coste de equipo, material directo, mano de obra directa en campo, costos indirectos etc. Además de características de estos equipos como la presión, dimensiones, caudales o longitudes.

La revista Chemical Engineering ha publicado un estudio para actualizar el precio a la actualidad utilizando el método de Guthrie. El método, al ser desarrollado en 1969, debe corregirse mediante un índice que actualice el precio; se utilizará el CEPCI, Chemical Engineering's Plant Cost Index. El valor del CEPCI para el año 2019 ha sido de 607,5 (Jenkins, 2019) que contrasta con el inicial del año 1969 cuyo valor era de 119 (Vatavuk, 2002).

Las siguientes tablas muestran los valores del factor de impresión para el método de Guthrie (tabla 2), el factor de presión y material (tabla 2), los parámetros para el cálculo del coste de los equipos (tabla 4) así como también el coste estimado de Guthrie (tabla 4).

| | |
|--------------------|-------------------------|
| Factor de presión | 1 (P < 50 psi) |
| Factor de material | 2,25 (acero inoxidable) |

Tabla 2: Valores para el método de Guthrie (Gutiérrez, 2003).

| Equipo | MPF |
|---------------------------|-------------------------|
| Recipientes a presión | $F_M \cdot F_P = 2,25$ |
| Intercambiadores de calor | $F_M \cdot (F_P + F_D)$ |

Tabla 3: Factor de presión y material, MPF (Gutiérrez, 2003).

| Equipo | C0(€) | S0 | A |
|-------------|-------|-----------|------|
| Secadora | 3.000 | 0,33 kg/h | 0,55 |
| Trituradora | 3.000 | 5,1 kg/h | 0,55 |
| Extrusora | 3.000 | 5,1 kg/h | 0,55 |

Tabla 4: *Parámetros para el cálculo del coste de los equipos (Sánchez, 2017).*

| Equipo | Coste (€) | Coste Actualizado (€) |
|-------------|-----------|-----------------------|
| Secadora | 2.500,00 | 2.975,00 |
| Trituradora | 2.975,00 | 3.540,25 |
| Extrusora | 4.850,00 | 5.771,50 |
| Total | | 12.286,75 |

Tabla 5: *Coste estimado de cada equipo mediante Guthrie.*

7.5 Costo total

Los costes estimados de los equipos ya han sido calculados en el apartado anterior. Ahora, se procederá a calcular el coste total de la instalación mediante el método de Chilton. Este método es parecido al descrito por Guthrie, se basa en la idea de asignar un factor a cada elemento que tenga un papel definido en el proyecto.

En el caso de este proyecto y, como se ha comentado anteriormente, el edificio, terreno, instalación de tuberías, líneas exteriores, ingeniería y construcción y equipos que ya están instalados no se van a contabilizar porque ya nos lo ofrece la ETSII. Por lo tanto, el coste total de la instalación se basa en los costes estimados de equipos que ya se han calculado.

Los equipos adquiridos tendrán otras funcionalidades educativas en la Escuela, a parte de la que se dará para este proceso. Es decir, su utilización no se requerirá únicamente para el proceso de reciclado por lo que los costes que estos requieren deberán ser recalculados. Se estima que el tiempo de utilización de estos equipos para este proyecto, en relación con otros que se realizarán dentro del laboratorio, es la mitad del total. Por lo que, los costes de estos sólo influirán en la mitad de los costes totales calculados en el apartado anterior. El coste total asciende a 6.143,37 €

7.6 Capital circulante

El capital circulante se define como la cantidad de dinero que se destina al funcionamiento de la instalación, que se ha de aportar al inicio del proyecto y en todo el momento hasta la finalización de esta.

Este coste corresponde a la compra de materia prima, costes de servicios, pérdidas de fabricación, salarios de los trabajadores, etc. Se puede meter en la categoría de costes variables, pero se define como capital circulante porque se recupera al final de la vida útil de la instalación. En el caso de este proyecto, la compra de materia prima es nula ya que esta se recogerá gratuitamente de los desechos de PLA que se produzcan en los diferentes departamentos de la ETSII y que puedan llegar de otras fuentes, como los coronamakers.

Para calcular el capital circulante existen diferentes métodos. El método global define el capital circulante como un 10-30% del desembolso inicial. En este caso, al ser la compra de materia prima nula, cogemos como capital circulante el valor inferior. Se utilizará el 10% del desembolso inicial como capital circulante

7.6.1 Calculo inmovilización de recursos

En función de todos los datos obtenidos, el desembolso inicial es la suma del coste total de la planta (6.143,37 €) y el coste del terreno (2.500 €). La inmovilización de recursos es la suma del desembolso inicial y del capital circulante (864,33 €), es decir 9507,7 €.

7.6.2 Flujo de caja de operaciones

El flujo de caja hace referencia a las entradas y salidas monetarias del proyecto. Es la cantidad de dinero que genera una empresa a partir de sus operaciones y el ejercicio de su actividad.

Las entradas de dinero se pueden conseguir de diferentes maneras. Las ventas producidas, el ahorro de costes derivados de la subvención, las subvenciones posibles y otros ingresos son algunos de los principales caminos para conseguir estas entradas. Por otra parte, las salidas de dinero se refieren a los gastos de producción, gastos fijos o impuestos.

En este proyecto, la única entrada de dinero son los ingresos por la venta de PLA o productos derivados a los departamentos de la ETSII o a sus estudiantes.

7.6.3 Ingresos

Como se ha comentado, la única fuente de ingresos de nuestro proyecto es la venta de PLA. Analizando los principales productores y distribuidores de PLA, el precio de este en el mercado está entre los 21,9 - 25,9 € por kilogramo. El PLA que se ha estudiado es el producido por la empresa SmartMaterials3D y cuyo precio de venta es de 23,5 € el kilogramo (SmartMaterials3D, 2020).

En función de la disminución de algunas propiedades que se han estudiado y el hecho de que el PLA que se pone a la venta está producido a partir del reciclado de PLA virgen, el precio que hemos estimado correcto es de 17,5 € el kilogramo.

La producción que se pueda poner a la venta para generar ingresos depende fundamentalmente de la cantidad de materia prima que se deseche y, por lo tanto, llegue al laboratorio para ser reciclada. Por tanto, se tomarán unos ingresos en función de la materia prima recibida.

7.6.4 Costo de producción

Los costes de producción se calculan a partir del coste de materia prima, el coste de servicios y mantenimiento de la instalación y los sueldos de los trabajadores necesarios. Los costes de materia prima y servicios entran en la categoría de costes variables ya que estos dependerán de la cantidad que se quiera producir. Al igual que se ha estudiado el incremento de los ingresos debido al aumento de ventas, eso conlleva un crecimiento a nivel de producción por lo que los costes variables deberán ir aumentando. La relación que se establece entre el crecimiento de los ingresos y los costes es de 3 a 1, es decir, los ingresos crecen 3 veces más rápido que los costes. Por lo tanto, se estima un crecimiento del 1% anual en los costes variables.

El coste de mano de obra o personal se considera un coste fijo ya que, en principio, el número de trabajadores no variará a lo largo de la vida útil de la instalación.

-7.6.5 Materia prima

Los costes de materia prima son prácticamente nulos. La materia prima será entregada de forma totalmente gratuita en forma de desechos o prototipos defectuosos. El único coste posible que esto puede acarrear es la manera de realizar esa recogida, pero, en principio, los costes de materia prima se van a considerar nulos.

Dentro de este apartado se deben contabilizar aquellos costes de materiales necesarios para el trabajo en el laboratorio. Pueden ser material de plástico, productos para limpieza del residuo recibido, productos para limpieza de los equipos, etc. Estos costes se estiman en 150 € anuales

7.6.6 Costo total del proyecto

| Concepto | Coste (€) |
|--------------------------|---------------|
| Materia prima y material | 300 |
| Equipos | 133,44 |
| Costes indirectos | 1670,86 |
| Personal | 6250 |
| Coste total | 8354,3 |

Tabla 6: Costo total del proyecto.

7.7 Impacto social y ambiental

El cambio climático es un problema que afecta a todos los países y Gobiernos del mundo. Por ello, en el año 2019, más de 150 Gobiernos y Estados de todo el mundo firmaron el tratado de París como solución a este gran problema.

Este tratado conllevaba a tomar medidas y objetivos sobre las emisiones permitidas en cada país. En septiembre de ese mismo año se creó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Esta Agenda es un plan de actuación, que recoge 17 grandes objetivos, los llamados Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS).

En definitiva, todas aquellas medidas o procesos cuyo fin sea el promover un consumo y producción sostenible, junto la utilización de nuevas metodologías, utilización de materiales biodegradables y poco perjudiciales para el medio ambiente y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, se pueden relacionar con los Objetivos del Desarrollo Sostenible.

Además, este proyecto cuenta con un carácter social importante en la ETSII y todas aquellas universidades del entorno. Promueve el modelo de economía circular junto con la participación de alumnos, profesores y trabajadores de diferentes departamentos para crear un modelo de producción y consumo sostenible, mediante el tratamiento de los propios residuos generados. La búsqueda de un aprovechamiento de estos residuos para darles una nueva vida promueve una concienciación a cerca de la reducción de residuos, la insostenibilidad de los combustibles fósiles y la urgente necesidad de cambio.

8. CAPITULO IV

8.1 CONCLUSIONES

- El ácido láctico es un producto químico que puede obtenerse de materias primas renovables entre las que están las de la industria azucarera. En el mundo, su empleo para la fabricación de polímeros biodegradables (PLA) está teniendo mucho auge porque se degradan y contribuyen a la disminución de la contaminación y por su capacidad para ser reabsorbidos por el organismo, que los hace apropiados para múltiples usos.
- El PLA es un material muy versátil con disímiles aplicaciones en distintas industrias. Este polímero ha creado un gran interés en las industrias médica, textil y de envases y envolturas por sus magníficas propiedades y su biodegradabilidad y, según la literatura, tiene un gran futuro porque es una innovación que puede sustituir a los plásticos de la petroquímica en muchos campos.
- Muchas instituciones de investigación en distintos países están trabajando en el mejoramiento y desarrollo de nuevos procesos de producción, tanto del ácido láctico como de sus polímeros, con el objetivo de hacerlos más eficientes y obtener productos finales con costos más bajos.
- El ácido poliláctico es un gran material para elementos de usar y tirar principalmente (por ejemplo: envases, botellas...), por lo que su uso en la industria de la construcción de claraboyas es muy poco factible. Las claraboyas, mamparas y demás elementos fabricados con este material podrían experimentar agujeros, roturas entre otras cosas, ya que pueden llegar a degradarse. Pueden aplicarse sustancias antioxidantes para evitarlo, pero todavía se requieren de investigaciones en este sector
- Las propiedades del poli (ácido láctico), descritas a lo largo de este trabajo, atribuyen a este polímero un papel de sustituto esencial para una gran serie de plásticos. El PLA es un plástico biodegradable derivado de biomasa, proveniente de una fuente renovable y

con una degradación biológica mucho menos perjudicial para el medio ambiente que la de plásticos derivados de combustibles fósiles.

- La degradación biológica se debe realizar en unas condiciones de temperatura, humedad y tiempo específicas para cada grado de PLA. La mejor forma de poder darle una segunda vida útil a este polímero es el reciclado mecánico. De esta manera, se consigue reducir el volumen de residuos producidos como el consumo de materia prima para la producción de polímeros vírgenes.

- Una de las aplicaciones, con mayor crecimiento en los últimos años, del poli (ácido láctico) es su utilización en la impresión 3D. El PLA tiene una buena fusión y adhesión a la plataforma de impresión, carece de vapor u olor durante el proceso, consta de excelente contracción térmica y la huella de carbono producida es muy inferior a la de otros materiales utilizados en este tipo de fabricación

A continuación, se explican las diferentes sugerencias de actuación e ideas para posibles trabajos futuros para continuar con el proyecto:

- Una alternativa al problema de la mezcla de diferentes grados de PLA en los residuos es conseguir que los consumidores de PLA en la Escuela utilicen el mismo grado de PLA, un grado de calidad que permita uno o varios reciclados. De esta manera se facilitaría el reciclado mecánico y así se podría obviar todas aquellas dificultades originadas por el PLA Corona Mezcla.

- Optimizar el proceso de reciclado mecánico con nueva maquinaria. En este proyecto, a causa de la pandemia, se ha triturado manualmente, lo que llevó más tiempo del razonable. Además, la extrusora utilizada fue de doble husillo, lo que proporciona una mayor degradación que una extrusora monohusillo.

- Realizar análisis de sensibilidad con diferentes factores que pudieran influir en la viabilidad económica del proyecto.

- Incentivar la entrega de residuos devolviendo al usuario un pequeño porcentaje de la cantidad entregada, de forma totalmente gratuita. De esta manera se podría aumentar la calidad de la materia prima recibida.
- Aumentar el volumen del proyecto, consiguiendo la participación de otras Escuelas, o de otras Universidades de la Comunidad. También se podría conseguir financiación privada o pública de diferentes empresas o instituciones públicas.
- Estudiar el empleo de técnicas de coste moderado y bajo impacto ambiental para mejorar las propiedades del PLA reciclado.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Maga, M. Hiebel, and N. Hosemann, "Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid." *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 149.
- [2] V. Mirón, S. Ferrándiz, D. Juárez, and A. Mengual, "Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials," *Procedia Manuf.*, vol. 13.
- [3] I. Anderson, "Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid," *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 4.
- [4] Visch, S., 2001. Biopolymers: ¿what is their place in future society in relation with sustainable design? *Sustainable Design*, 201, pp.1-9. Available at: <http://www.angeTfire.com/freak/rat xxx/default.html>.
- [5] V. Speranza, A. de Meo, R.P., 2014. Thermal and hydrolytic degradation kinetics of PLA in the molten state. *Polymer Degradation and Stability*, 100, pp.37—41.
- [6] Song Y, Yan Y, Zhang R, Xu D, W.F., 2002. Manufacturing of the die of an automobile deck part based on rapid prototyping and rapid tooling technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), pp.237- 242.
- [7] Scheirs, J., 1998. *Polymer recycling science, technology, and applications 4th ed.*, Wiley
- [8] Last, P. 3D Printing for Chocolate Molds Guide Contents Overview Customize & Design 3D Printing. Available at: <https://learn.adafruit.com/downloads/pdf/3d-printed-chocolate-castings.pdf> [Accessed March 20 2015].
- [9] CustomPartNet, Additive Manufacturing. 24.03.2015. Available at: <http://www.custompartnet.com/wu/additivefabrication> [Accessed January 1, 2001].
- [10] Avérous, L., 2011. *Polylactic Acid: Synthesis, Properties and Applications*. In *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*. Elsevier.
- [11] Al-Salem S.M., Lettieri, P. & Baeyens, J., 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), pp.2625-2643. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>.
- [12] Zhai, Y., Lados, D. a. & LaGoy, J.L., 2014. Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation. *Jom*, 66(5), pp.1—9

- [13] Xiao, L. et al., 2006. Poly (Lactic Acid) -Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications. *Biomedical Science, Engineering and Technology*, 11, pp.247-302.
- [14] Visch, S., 2001. Biopolymers; ¿what is their place in future society in relation with sustainable design? *Sustainable Design*, 201, pp.1-9. Available at: <http://www.angeTfire.com/freak/rat xxCdefault.html>.
- [15] Theriault, R., Osswald, T. a. & Stradins, L., 199T. Properties of thermosetting polymers during cure. In *Technical papers of the anuaT technical conference-society of plastics engineers incorporated*. Wisconsin, pp. T66- 773.
- [16] Södergård, A. & Stolt, M., 2002. Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 27, pp.1123-1163
- [17] Shanks, R. & Kong, I., 2012. *Thermoplastic Elastomers 4th ed.* A. Z. El-Sonbati, ed., Rijeka, Croatia: Intech. Available at: <http://www.intechopen.com/books/thermoplastic-elastorriers>.
- [18] Rydberg, T., 199a. Cascade accounting in life cycle assessment applied to polymer recycling. *Polymer Recycling*, 1(4), pp.233-241.
- [19] Abdel-Rahman MA, Tashiro Y., Sonomoto K. Avances recientes en la producción de ácido láctico mediante procesos de fermentación microbiana. *Biotechnol. Adv.* 2013; 31: 877–902. doi: 10.1016 / j.biotechadv.2013.04.002.
- [21] Agrawal CM, Athanasiou KA Técnica para controlar el pH en las proximidades de implantes PLA-PGA biodegradables. *J. Biomed. Mater. Res.* 1997; 38: 105-114. doi: 10.1002 / (SICI) 1097-4636 (199722) 38: 2 <105: AID-JBM4> 3.0.CO; 2-U.
- [22] Athanasiou KA, Niederauer GG, Agrawal CM Esterilización, toxicidad, biocompatibilidad y aplicaciones clínicas de copolímeros de ácido poliláctico / ácido poliglicólico. *Biomateriales.* 1996; 17 : 93-102. doi: 10.1016 / 0142-9612 (96) 8754-1.
- [23] Auras, R. A., Lim, L. T., Selke, S. E., & Tsuji, H. (Eds.). (2011). *Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications (Vol. 10)*. John Wiley & Sons. *Biopolymers as viable alternatives to common plastic materiales.* (2000) Galactic

[24] Laboratories. (Sitio web de Galactic Laboratories: www.lactic.com) (www.nf2000.org/secure/Fair/S1264.htm)

[25] Canales Sectoriales. La Tendencia positiva para la industria de bioplásticos se mantiene estable. 2019.

[26] Ebnesajjad, S. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties,

[27] Proccessing and Applications. s.l. : William Andrew, Elsevier, 2013.

[28] Ercros. Ensayo de biodegradación por compostaje industrial. Departamento de Ingeniería Química de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), en septiembre de 2014.

[29] European Bioplastics. Bioplastics: Facts and Figures. [En línea] 2014. <http://www.european-bioplastics.org/>.

[30] F. Aeschelmann, M. Carus. Bio-based Building Blocks and Polymers in the

[31] World Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020. [En línea] 2015. <http://bio-based.eu/markets/>.

[32] G. Scott, D. M Wiles. Reviews - programmed-life plastics from polyolefins: a new look at sustainability. Biomacromolecules. 3. 2001, Vol. 2, pág. 615e622.

[33] Inkinen S., Hakkarainen M., Albertsson A.-C., Sodergard A. Del ácido láctico al poli (ácido láctico) (PLA): caracterización y análisis de PLA y sus precursores. Biomacromoléculas. 2011; 12: 523–532. doi: 10.1021 / bm101302t.

[34] Li, G., Zhao, M., Xu, F., Yang, B., Li, X., Meng, X., Teng, L., Sun, F. y Li, Y. (2020). Síntesis y aplicación biológica del ácido poliláctico. Moléculas (Basilea, Sui za), 25 (21), 5023. <https://doi.org/10.3390/molecules2521502>

[35] PEBD: Polietileno de Baja Densidad, PEAD: Polietileno de Alta Densidad, PET: Polietileno Tereftalato, PP: Polipropileno, PVC: Policloruro de Vinilo, PS: Poliestireno, PC: Policarbonato, ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno