

Diseño de un sistema de producción de materia prima para impresión 3D a partir de residuos plásticos

Cristian Felipe Idárraga ^{1 a,c}, David Sebastián Ojeda ^{2 a,c},

Mario Fernando Muñoz Velez ^{b,c}, Kathleen Georjajna Salazar Serna ^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

^dEntidad y área donde realizó el estudio

Resumen

Con la aparición de nuevas tecnologías en los últimos años, la manufactura aditiva se ha visto en auge de la industria moderna, permitiendo el diseño de una variedad de productos, presentando beneficios para diferentes modelos de negocios. Dentro de los procesos referentes a la manufactura aditiva, la impresión 3D mediante modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés), es una de las más usadas por la fácil operación, adquisición de equipos de procesamiento e insumos. Sin embargo, al usarse materiales poliméricos en dicho proceso, se genera una gran cantidad de desechos plásticos que usualmente no son contemplados dentro de los procesos de recolección y reciclaje. Lo anterior, abre una ventana de oportunidad, al considerar el reúso/reciclaje del ácido poliláctico (PLA), el cual es uno de los materiales poliméricos más usados en la impresión 3D, con el propósito de producir materia prima, para la fabricación de filamentos para FDM que sean sostenibles, y amigables con el medio ambiente. Con dicho propósito, se evaluaron diferentes mezclas de PLA virgen/reciclado (90/10, 80/20, 70/30), las cuales se obtuvieron mediante el proceso de extrusión; y se estimaron las propiedades mecánicas (tensión y flexión). Posteriormente, a partir de los resultados de la evaluación mecánica, se eligió la mezcla PLA/PLA-R de 90/10, como el material a trabajar para el desarrollo del diseño del sistema de producción de materia prima para filamentos de impresión 3D. Este material presentó un decremento en la resistencia a la tensión del 2,38% y del 24,87%, en la deformación en la carga máxima. Por su parte, el diseño del sistema de producción se realizó con enfoque en el Valle del Cauca, siendo validado a partir de la elaboración del prototipo. Adicionalmente, se hizo un análisis de factibilidad financiera en el cual se obtuvo un VPN promedio de \$549.109.593 COP y un riesgo para el inversionista de 13,6% de obtener pérdidas.

Palabras claves Manufactura aditiva, Filamento, PLA, Reutilización, Sistema de producción

Abstract

With the emergence of new technologies in recent years, additive manufacturing has seen the rise of modern industry, allowing the design of a variety of products, presenting benefits for different business models. Within the processes related to additive manufacturing, 3D printing through fused deposition modeling (FDM) is one of the most used due to its easy operation, acquisition of processing equipment and supplies. However, the use of polymeric materials in this process generates a large amount of plastic waste that is usually not considered in the collection and recycling processes. The above opens an opportunity when considering the reuse/recycling of polylactic acid (PLA), which is one of the most used polymeric materials in 3D printing, to produce raw material, for the manufacture of filaments for FDM that are sustainable, and friendly with the environment. For this purpose, different mixtures of virgin / recycled PLA (90/10, 80/20, 70/30) were evaluated, which were obtained through the extrusion process; and the mechanical properties (tension and bending) were estimated. Subsequently, based on the results of the mechanical evaluation, the PLA / PLA-R mixture of 90/10 was chosen as the material to work for the development of the design of the raw material production system for 3D printing filaments. This material presented a decrease in tensile strength of 2,38% and a 24,87% decrease in deformation at maximum load. For its part, the design of the production system was carried out with a focus on the Valle del Cauca, being validated from the development of the prototype. In addition, a financial feasibility analysis was carried out in which an average VPN of COP 549.109.593 was obtained and risk for the investor of 13,6% of obtaining losses.

Keywords: Additive manufacturing, Filament, PLA, Reuse, Production system

Tabla de contenido

| | | |
|-------|--|----|
| I. | PROJECT CHARTER | 5 |
| II. | DEFINIR..... | 7 |
| | A. Contexto y Justificación | 7 |
| | B. Grupos de interés..... | 9 |
| | C. Requerimientos..... | 12 |
| III. | MEDIR..... | 15 |
| | A. Plan de recolección de datos..... | 15 |
| | B. Exploración del mercado..... | 17 |
| IV. | ANALIZAR | 23 |
| | A. Análisis de Oportunidad..... | 23 |
| | B. Revisión de literatura..... | 26 |
| | C. Exploración de ideas y selección de alternativa | 28 |
| | D. Objetivos | 31 |
| | E. Plan de trabajo (PdT)..... | 32 |
| V. | DISEÑAR | 34 |
| | A. Desarrollo del diseño de la solución..... | 34 |
| | B. Validación del diseño propuesto..... | 47 |
| VI. | VERIFICAR..... | 48 |
| | A. Medición de los impactos..... | 48 |
| | B. Estandarización de la solución | 53 |
| | C. Conclusiones | 54 |
| | D. Recomendaciones..... | 55 |
| VII. | GLOSARIO | 56 |
| VIII. | REFERENCIAS..... | 57 |
| IX. | ANEXOS | 61 |

Índice de Tablas

| | | |
|-------------|--|----|
| TABLA I. | DEFINICIÓN GRUPOS DE INTERÉS | 10 |
| TABLA II. | REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS | 13 |
| TABLA III. | INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR..... | 16 |
| TABLA IV. | CARACTERÍSTICAS DE FILAMENTOS MÁS COMUNES SEGÚN MATERIAL [17]..... | 20 |
| TABLA V. | ANÁLISIS DOFA DISEÑO DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D | 22 |
| TABLA VI. | RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO | 23 |
| TABLA VII. | RESUMEN REVISIÓN DE LITERATURA | 26 |
| TABLA VIII. | INDICADORES AMBIENTALES [26]..... | 30 |
| TABLA IX. | PRIORIDAD Y CONSISTENCIA DE CRITERIOS DE LA METODOLOGÍA AHP..... | 31 |
| TABLA X. | PRIORIDAD DE ALTERNATIVAS | 31 |
| TABLA XI. | PLAN DE TRABAJO | 32 |

| | |
|---|----|
| TABLA XII. NOMENCLATURA DE LOS DIFERENTES MATERIALES ESTUDIADOS..... | 34 |
| TABLA XIII. PROPIEDADES PLA 2003D DE NATURE WORK..... | 35 |
| TABLA XIV. FICHA TECNICA PLA/PLA-R..... | 40 |
| TABLA XV. PRONÓSTICO DE LA DEMANDA DE PLA..... | 42 |
| TABLA XVI. REQUISITOS PARA PRODUCCIÓN DE FILAMENTO..... | 42 |
| TABLA XVII. REQUISITOS DE ALMACENAJE..... | 43 |
| TABLA XVIII. VALORES Y CALIFICACIÓN..... | 45 |
| TABLA XIX. MATRIZ DE RELACIONES POR DEPARTAMENTO..... | 45 |
| TABLA XX. RESULTADOS DE KPI's..... | 48 |
| TABLA XXI. ACTIVOS FIJOS ADQUIRIDOS Y PRECIO DE ADQUISICIÓN..... | 49 |
| TABLA XXII. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS CRITERIOS DE FACTIBILIDAD FINANCIERA..... | 51 |
| TABLA XXIII. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD..... | 51 |
| TABLA XXIV. DISTRIBUCIONES Y PARAMETROS ESTABLECIDOS PARA LA SIMULACIÓN..... | 51 |
| TABLA XXV. RESULTADOS OBTENIDOS PARA VPN Y TIR EN LA SIMULACIÓN..... | 51 |
| TABLA XXVI. FORMATO POE PARA LA PRODUCCION DE FILAMENTO..... | 53 |
| TABLA XXVII. TABLA DE ANEXOS..... | 61 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Tasa de aprovechamiento y tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos y productos residuales generados [4]. | 7 |
| Fig. 2. Incremento en tasas de consumo para el año 2025 [5]. | 8 |
| Fig. 3. perspectiva del ciclo de manufactura enfocado a la MA [8]. | 9 |
| Fig. 4. Diagrama de Pareto definición de importancia de grupos de interés. | 11 |
| Fig. 5. Matriz Influencia/Impacto para grupos de interés. | 12 |
| Fig. 6. SIPOC del proceso de diseño de filamento para impresión 3D. | 17 |
| Fig. 7. Diagrama de flujo de producción de filamento para impresión 3D. | 18 |
| Fig. 8. Preferencia de consumidores por material para filamentos de impresión 3D. | 19 |
| Fig. 9. Contexto para el uso de impresión 3D [18]. | 20 |
| Fig. 10. Materiales usados en impresión 3D [18]. | 21 |
| Fig. 11. Análisis PESTEL entorno manufactura aditiva. | 21 |
| Fig. 12. Aplicaciones de la impresión 3D | 23 |
| Fig. 13. Necesidades de la industria de impresión 3D | 24 |
| Fig. 14. Método Disney para el análisis de alternativas. | 28 |
| Fig. 15. Proceso de reciclado de plásticos. | 30 |
| Fig. 16. a) Molino de golpe (Ubicado en el Centro ASTIN-SENA), b) PLA reciclado posteriormente de ser triturado. | 35 |
| Fig. 17. a) Proceso de obtención de mezcla, b) materiales de estudio extruidos y molidos. | 36 |
| Fig. 18. Placas obtenidas de PLA/PLA-R. | 36 |
| Fig. 19. Diagrama de proceso para moldeo de placas. | 37 |
| Fig. 20. Distribución de probetas por placa. | 37 |
| Fig. 21. Máquina universal para ensayos mecánicos INSTRON 3366 | 38 |
| Fig. 22. Graficas ensayo de tensión por muestra. | 39 |
| Fig. 23. Graficas ensayo de flexión por muestra | 39 |
| Fig. 24. Grafica de densidad por muestras | 40 |
| Fig. 25. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de filamento para impresión 3D | 41 |
| Fig. 26. Equipos necesarios en la fabricación de filamento para impresión 3D [33] [34] [35] [36] [37] [38]. | 43 |
| Fig. 27. Localización de planta | 44 |
| Fig. 29. Diagrama de relación de actividades | 46 |
| Fig. 28. Propuesta distribución general de la planta | 46 |
| Fig. 30. Proceso de prototipado | 47 |
| Fig. 31. Modelo en SIMIO de producción de filamento para impresión 3D a partir de residuos de PLA. | 48 |
| Fig. 32. Estado de resultados para proyecto de producción de filamento a base de material reciclado. | 49 |
| Fig. 33. Flujo de Caja Libre de la operación | 50 |
| Fig. 34. Flujo de Caja Libre del Inversionista | 50 |
| Fig. 35. Análisis de riesgo del VPN para el FCL y FCLI. | 52 |

Fig. 36. Gráfico Tornado para análisis de sensibilidad y riesgo..... 52

Fig. 37. Formato registro de producto terminado..... 54

LPROJECT CHARTER

| Descripción (<i>Business case</i>) | | Planteamiento del problema (<i>Problem statement</i>) | | |
|---|--|---|--|--|
| <p>En los últimos años debido a que se ha ido presentando un aumento en la población y a su vez esto conlleva a un crecimiento de la demanda y el consumo de productos plásticos, se ha estimado que las tasas de generación de residuos resultado de estos productos podrían ser demasiados altas y continuar con el problema de contaminación debido a sus altos volúmenes y durabilidad, también se ha registrado que las tasas de aprovechamiento y reciclaje en Colombia son demasiado bajas, lo cual se evidencia en el último boletín técnico “Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales” realizado por el DANE, en el cual se aproxima que de 12,1 millones de toneladas de residuos sólidos producidos anualmente en el país, solo el 11,1% es reciclado, convirtiéndose en una necesidad el encontrar nuevas alternativas sostenibles que permitan el aprovechamiento de residuos y un crecimiento económico del país.</p> <p>Por otro lado, se estudia una industria en crecimiento como lo es la manufactura aditiva (MA), en la cual una de sus principales materias primas son filamentos a base plásticos, usados en las impresoras 3D en la creación de diversas piezas. De lo anterior surge una posible alternativa con la reincorporación de residuos plásticos a la cadena productiva en la fabricación de filamentos.</p> | | <p>Una alternativa para disminuir la contaminación causada por los plásticos es el aprovechamiento de estos mediante el reciclaje, en conjunto con la demanda de filamentos a base de plástico, usadas en la impresión de piezas 3D para una industria en crecimiento como lo es la MA, surge la oportunidad de realizar un diseño para el proceso de elaboración de filamentos con material plástico reciclado, empleando para ello PLA (ácido poliláctico), un biopolímero utilizado comúnmente por los usuarios de impresoras 3D.</p> | | |
| Impacto de los actores (<i>Stakeholder's business needs</i>) | | Restricciones | Especificaciones | Marco legal |
| <ul style="list-style-type: none"> El proyecto podría beneficiar a las empresas manufactureras de filamentos y piezas 3D, generando un valor agregado a sus productos, ya sea en costos o brindando a sus clientes un producto amigable con el medio ambiente que utiliza materiales reciclados. Fomenta las buenas prácticas en la manufactura de plásticos, el aprovechamiento de residuos e impulsa las industrias entorno al plástico. La implementación del proyecto serviría como apoyo a las campañas de innovación y desarrollo sostenible del estado. | | <ul style="list-style-type: none"> Propiedades físicas, térmicas y mecánicas de los materiales. Insuficiencia de material reciclado necesario para satisfacer la demanda. Condiciones no aptas o recuperación y procesamiento de alto costo de los residuos plásticos. Costo de pruebas y ensayos del proceso de diseño en la evaluación de los materiales. Normas de regulación para el manejo y gestión de los residuos sólidos Comprensión de los diferentes conceptos fundamentales para la elaboración de filamentos 3D a base de polímeros. | <ul style="list-style-type: none"> El material a fabricar e implementarse debe poseer características particulares las cuales permitan su producción. El filamento a diseñar debe poseer características similares a los materiales disponibles en el mercado. El filamento debe ser resultado de la mezcla de material virgen y reciclado. Proporcionar en una ficha técnica las características físicas y térmicas del material. Debe generarles un beneficio a los fabricantes, ya sea económico, productivo u otro aspecto. | <ul style="list-style-type: none"> Artículo 1.3.14.4 Decreto 1625 de 2016. Decreto 495 del 2016 Norma UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020. |
| Indicadores de Desempeño (<i>KPI's</i>) | | | | |
| Variable | Actualidad | Meta | | |
| Eficiencia del reciclado | 8.3% de aprovechamiento de material reciclado. | Alcanzar mínimo el 10% de aprovechamiento de residuos post-industriales. | | |
| Relación de mezcla de material virgen y reciclado | No se realizan filamentos con mezcla de material reciclado y virgen. | Superar el 10% de material reciclado según el estado del arte. | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---------------------------------|-------------|
| Costo de reciclaje | Debido a que no se realiza uso de material reciclado en la producción de filamentos, no existe un costo actual. | Minimizar los costos de recuperación de material en el mayor valor posible. | | | |
| Utilidad del producto | Debido a que no se realiza uso de material reciclado en la producción de filamentos, no existe un valor de la utilidad económica. | Al relacionarse con los costos de recuperación se buscará minimizar los costos con el fin de así obtener la mayor utilidad posible. | | | |
| Objetivo general (Goal statement) | | | | | |
| Diseñar un sistema productivo para la obtención de un material a partir de la mezcla de PLA reciclado y virgen, susceptible de ser usado en la fabricación de filamentos para impresión 3D. | | | | | |
| Objetivos específicos (Project scope) | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar las propiedades mecánicas del filamento de PLA virgen y reciclado. • Definir proporciones de PLA reciclado a partir de la evaluación mecánica de diferentes mezclas con polímero virgen. • Caracterizar las propiedades físico-térmicas de la mezcla seleccionada. • Diseño del proceso de fabricación de un filamento susceptible de ser usado para impresión 3D, con el material seleccionado. • Evaluar la viabilidad financiera del proceso de producción del filamento. | | | | | |
| Plan de Trabajo (Project Plan) | | Equipo de trabajo (Team members) | | | |
| Actividad | Fecha Inicio | Fecha Fin | | | |
| Área IISE | Nombre | Rol | | | |
| 1.1. Definición de la fuente y adecuación del material reciclado. | 15 de febrero de 2021 | 26 de febrero de 2021 | 12.1.Product Design & Development | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 1.2. Elaboración de las probetas de ensayo a partir del polímero virgen y reciclado. | 1 de marzo de 2021 | 6 de marzo 2021 | | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 1.3. Realizar ensayos mecánicos a tensión del material virgen y reciclado. | 8 de marzo de 2021 | 20 de marzo 2021 | | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 1.4. Interpretar los datos obtenidos. | 15 de marzo de 2021 | 27 de marzo 2021 | | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 2.1. Establecer teóricamente las diferentes proporciones de mezcla que se evaluarán. | 22 de marzo de 2021 | 27 de marzo 2021 | 12.1.Product Design & Development | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 2.2 Realizar las mezclas de polímero reciclado y virgen con las proporciones definida teóricamente. | 29 de marzo de 2021 | 3 de abril de 2021 | | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 2.3. Elaboración de las probetas de ensayo a partir de las mezclas. | 5 de abril de 2021 | 10 de abril de 2021 | | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 2.4. Realizar ensayos mecánicos a tensión del material virgen y reciclado. | 12 de abril de 2021 | 30 de abril de 2021 | | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 2.5. Interpretar los datos obtenidos y selección de mezcla para la fabricación de filamento para impresión 3D. | 26 de abril de 2021 | 8 de mayo de 2021 | | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 3.1. Evaluar las transiciones térmicas del material. | 12 de abril de 2021 | 24 de abril de 2021 | 12.1.Product Design & Development | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 3.2. Estimar la densidad del material. | 12 de abril de 2021 | 24 de abril de 2021 | | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 3.3. Interpretar los datos obtenidos. | 26 de abril de 2021 | 8 de mayo de 2021 | | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 4.1. Pruebas de viabilidad de obtención de filamento. | 26 de abril de 2021 | 8 de mayo de 2021 | 12.1. Product Design & Development | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 4.2. Definir el proceso para la elaboración de filamentos para impresión 3D. | 5 de mayo de 2021 | 10 de mayo de 2021 | | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 4.3. Definir los requisitos del proceso final: mano de obra, materia prima y maquinarias. | 5 de mayo de 2021 | 10 de mayo de 2021 | 4. Facilities Engineering & Energy Management | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 4.4. Planear una distribución de planta. | 5 de mayo de 2021 | 10 de mayo de 2021 | | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |
| 5.1. Estudiar la demanda del producto. | 12 de mayo de 2021 | 17 de mayo de 2021 | 3. Engineering Economic Analysis | Cristian Felipe Idarraga Ortega | Harmonizer |
| 5.2. Evaluar financieramente el proyecto. | 12 de mayo de 2021 | 17 de mayo de 2021 | | David Sebastian Ojeda Huertas | Compromiser |

II.DEFINIR

A. Contexto y Justificación

Los plásticos son uno de los materiales más usados a nivel mundial, gracias a su bajo peso, maleabilidad y bajo costo, permiten que millones de empresas en el mundo los implementen en sus procesos de producción [1]. El plástico puede tomar la forma de prácticamente cualquier objeto, razón por la cual es utilizado a diario como contenedor de alimentos, empaque de materia prima, juguetes, implementos de construcción, entre otros. La problemática de los plásticos es que es usado en la fabricación de productos de un solo uso, donde su tiempo útil es corto, en comparación con el tiempo de degradación del mismo; lo anterior, sumado a una mala práctica de recolección de los residuos, resulta en un gran problema medioambiental por contaminación de ríos, océanos, entre otros. Se estima que desde 1950 solo el 9% de plástico utilizado se ha reciclado correctamente y estudios más recientes revelan que esta tasa aumentó a solo un 14% a escala global [2]. Estas cifras no ven mejoría alguna si se habla con respecto a países en vía de desarrollo como lo es Colombia [3]. Como se puede observar en la Fig. 1, según el último boletín técnico “Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales” realizado por el DANE, de aproximadamente 12,1 millones de toneladas de residuos sólidos que produce el país anualmente solo el 11,1% es reciclado, esto comparado con países como Holanda que reciclan cerca del 95% de su basura, es considerablemente poco [4].

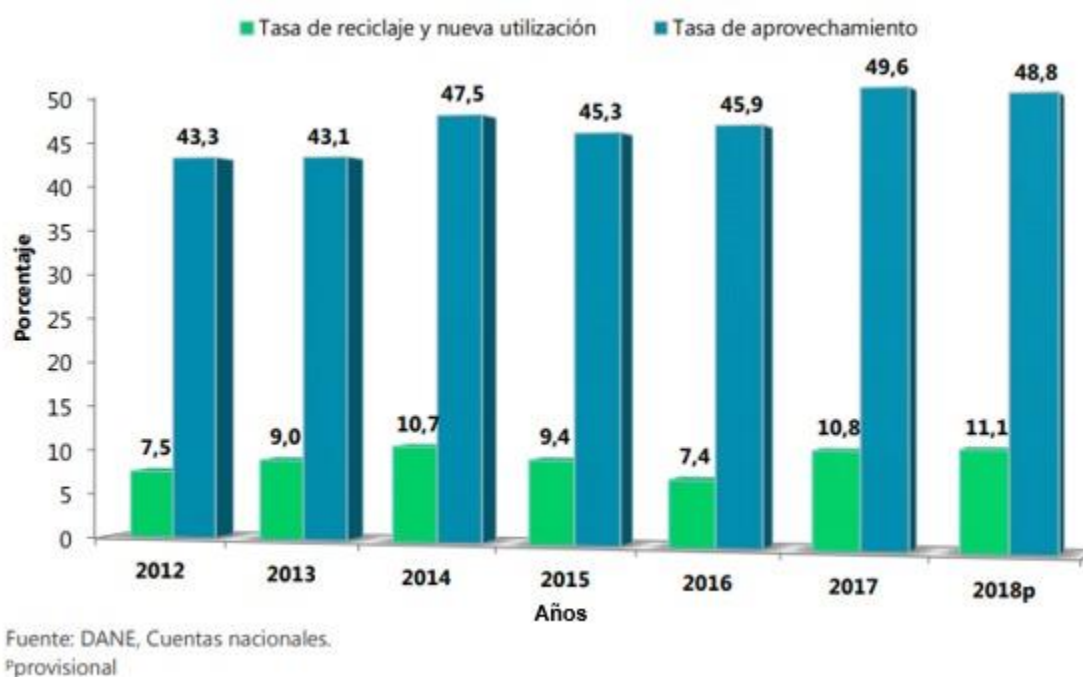
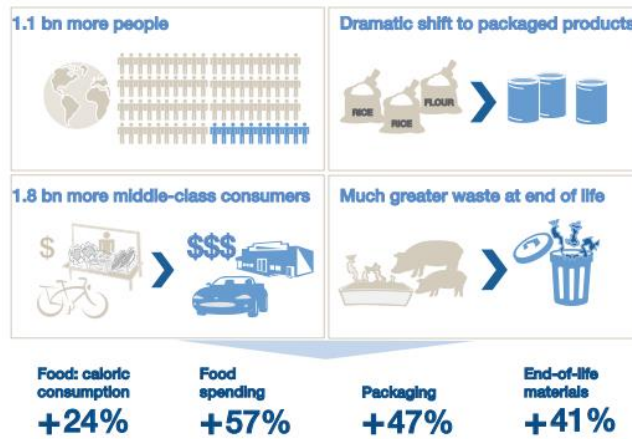


Fig. 1. Tasa de aprovechamiento y tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos y productos residuales generados [4].

En este orden, el alto consumo de residuos plásticos acompañado de una economía lineal (Comprar, utilizar, tirar) representa grandes problemas no solo a nivel medioambiental, sino también a nivel de sostenibilidad; Colombia a partir del año 2000 ha tenido una economía con una estabilidad superior a la observada en la región de América Latina, con una tasa de crecimiento promedio de 4,3% lo posiciona como un país con una fuerte economía emergente. Sin embargo, si se sigue creciendo a estas proporciones la cantidad de recursos fósiles necesarios para la producción de empaques plásticos, no darán abasto para el año 2025. Como se observa en la Fig.2, según el banco mundial dentro de 5 años habrá cerca de mil millones de personas más en el mundo, esto conllevará a que la demanda de empaques aumente en un 47% con respecto a la población actual, lo cual implica un reto el poder satisfacer por completo la demanda de productos que requieran un empaquetamiento plástico [5].



Source: World Bank, Ellen MacArthur Foundation circular economy team

Fig. 2. Incremento en tasas de consumo para el año 2025 [5].

Por lo tanto, la imperativa necesidad por adoptar una economía enfocada a la reutilización y aprovechamiento máximo de los materiales como el plástico, resulta ser una nueva oportunidad en todo el mundo que debe ser tenida en cuenta como prioridad. Para esto, la manufactura aditiva (MA) -también conocida como impresión 3D- se ha convertido para las empresas en una parte clave en la transición de una economía lineal a circular, ya que, permite generar un balance entre el conflicto de intereses que algunas industrias presentan al momento de querer adoptar esta nueva forma productiva, pero que por aspectos económicos, organizacionales o gubernamentales no ha sido posible; Mika Sillanpää y Chaker Ncibi plantean en su artículo “*Circular economy in action*” los distintos cuestionamientos que las manufactureras tienen al momento de considerar la inclusión de la impresión 3D en su proceso productivo y lo contrastan con los beneficios potenciales que les podría generar. Por ejemplo: ahorros netos de material, mitigación en el problema crónico de volatilidad y riesgos de suministro e incremento en velocidad de producción para productos personalizados [6].

Adicionalmente, la producción de partes de repuestos al interior de las propias industrias es uno de los beneficios más importantes en el momento para la MA, grandes empresas como Boeing y Ford producen en sus propias instalaciones partes que son utilizadas para sus vehículos, lo cual les ha permitido reducir su nivel de inventario [7]. En consecuencia, esta nueva modalidad de abastecimiento modifica el rol de los proveedores dentro de las líneas de producción, ya que, la necesidad de transporte será mucho más cuidadosa debido a que la MA permitirá la descentralización de la producción hacia localidades cercanas a los clientes o en el escenario más extremo, en las instalaciones del cliente [8]. En este orden, la implementación de la impresión 3D dentro del sistema de producción de diferentes industrias a nivel mundial, ha tenido resultados positivos, lo cual, indica que existe un mercado que se ve beneficiado económicamente por la utilización de plásticos para impresión 3D. Según proyecciones económicas se espera que el mercado global de plásticos de impresión 3D crezca de USD 523,94 millones en 2019 a USD 1.685,23 millones para fines de 2025 a una tasa de crecimiento anual compuesta del 21,49% [9].

En consecuencia, las oportunidades económicas ligadas a la implementación de la impresión 3D han sido considerables en los últimos años; como se mencionó anteriormente, la MA ha tenido un crecimiento exponencial en los mercados económicos mundiales, ocasionando que cada vez nuevas empresas opten por la utilización de esta modalidad en sus procesos productivos, existen dos beneficios económicos principales, que la incursión en la MA puede generar en los procesos productivos, estos son: líneas de productos diferenciados por diseños personalizados y reutilización de residuos plásticos [10]. El primero, consiste en que debido al nivel de detalle de la impresora 3D, es posible la introducción de una nueva línea de productos personalizados por el cliente, lo cual, aumenta potencialmente el valor agregado del producto. El segundo y más importante a nivel de sostenibilidad, consiste en la generación de nuevas fuentes de ingresos por la utilización de desperdicio de residuos plásticos, generados en procesos primarios (Moldeo, corte, extrusión) del ciclo productivo. En este orden, la re-fabricación de materia prima a partir de residuos es una alternativa amigable con el medio ambiente que genera una utilidad adicional gracias a la reutilización del residuo del plástico. Sin embargo, para una implementación exitosa en el sistema de producción se requieren diferentes características, especificaciones técnicas y operacionales, necesarias para que sea funcional y eficiente el nuevo material. En la Fig.3 se muestra todo el ciclo productivo enfocado a la MA.

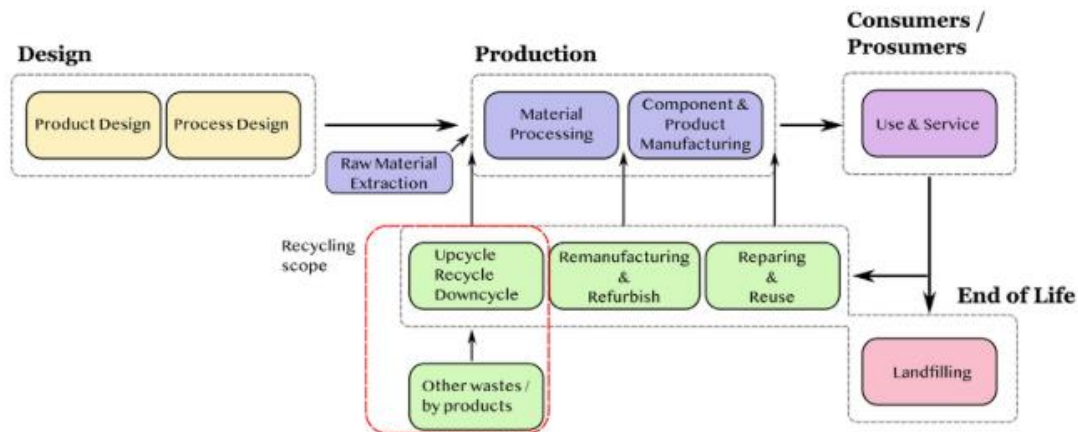


Fig. 3. perspectiva del ciclo de manufactura enfocado a la MA [8].

Para los tres procesos principales que se muestran en la Fig.3, (diseño, producción y reciclaje) deben conocerse las especificaciones y requerimientos de cada uno para una correcta implementación del sistema; en cuanto al proceso de diseño, las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material resultan fundamentales para determinar el máximo porcentaje de material reciclado que es posible usarse en el proceso de fabricación de filamentos de impresión 3D, sin que se vean afectadas las propiedades del material requeridas para un óptimo procesamiento y utilización.

Aunque la impresión 3D por deposición de filamento se desarrolló alrededor de 1980, es en los últimos años que se ha incrementado el uso de modelado por deposición de filamento (MDF) tanto desde el punto de vista profesional como en el semi-profesional, debido a la apertura comercial y a la proliferación de impresoras 3D de costo más accesible. En la actualidad la MA es considerada como una herramienta versátil para la construcción de piezas complejas, útiles y funcionales, como componentes o partes de productos intermedios o como bienes comerciales definitivos además de una oportunidad de optimización de costos de diseño y producción [11].

El crecimiento de industrias como la mecánica, automotriz, aeroespacial y médica entre otras, ha generado una búsqueda constante de innovación y creación de nuevos materiales para reducir costos y mejorar la calidad de sus productos. El crecimiento y desarrollo de la industria de investigación ha sido afectado por la inserción de equipo capaz de generar prototipos y productos con mayor facilidad, siendo estos equipos dependientes del tipo de material que consumen [12]. La fabricación de filamentos para impresión 3D es una parte importante en el desarrollo e innovación que requieren las diferentes industrias, debido a esto, se vuelve imprescindible el estudio de diferentes materiales y procesos para diseñar y producir nuevos filamentos más asequibles y de mejor calidad.

En vista de las consideraciones anteriormente mencionadas, además, realizando una investigación de los diferentes polímeros termoplásticos (ABS, PET, Nylon, PLA, ...), los cuales se pueden implementar en el proyecto y definiendo la proporción que poseerá el filamento que diseñará el equipo de trabajo a base de material reciclado y material virgen, donde el producto final sea apto para su producción y aplicación en la manufactura aditiva. Puede representar beneficios ambientales como la reutilización de residuos post-proceso e implementación de polímeros de un único uso, también representando posibles beneficios económicos, en donde si las industrias productoras de filamentos obtienen ingresos superiores al costo de realizar el reciclaje de los materiales se verán beneficiadas por la implementación de la alternativa propuesta.

B. Grupos de interés

Las partes interesadas son todas aquellas personas u organizaciones que se ven afectadas por los resultados o desarrollo del proyecto. Para identificar los grupos de interés se lleva a cabo una caracterización que determina aspectos e información relevante para el proyecto. En este orden, la clasificación se realiza teniendo en cuenta dos criterios que son: Influencia e impacto. El primero se refiere al nivel de participación que tiene en el proyecto y el segundo define la capacidad de efectuar o provocar cambios en este. Finalmente, los criterios se evalúan en una escala de 1 a 10, siendo 10 la calificación más alta y 1 la más baja. La información detallada de lo mencionado anteriormente se muestra en la TABLA I.

TABLA I.
DEFINICIÓN GRUPOS DE INTERÉS

| NUMERO | GRUPO DE INTERÉS | SUBGRUPO | CARACTERIZACIÓN | INFLUENCIA | | IMPACTO | |
|--------|---------------------------------------|--|---|---|---------|--|---------|
| | | | | Descripción | Puntaje | Descripción | Puntaje |
| 1 | Clientes | Empresas productoras de filamentos para impresión 3D | Fabrican y distribuyen filamentos de impresión 3D y productos asociados. | Establecen los requerimientos para el diseño del filamento. | 9 | Uso de productos con materiales reciclables y reintegración a la cadena productiva residuos sólidos. | 7 |
| | | Usuarios de impresora 3D | Persona natural o jurídica que fabrica piezas volumétricas haciendo uso de impresoras 3D. | | | | |
| 2 | Industrias | Plástico | Elaboración de productos plásticos. | Proporciona material reciclable e información, en baja medida. | 2 | Establecer procedimientos para el manejo de residuos reciclables y su posterior utilización en el diseño de un material útil en la producción. | 6 |
| | | Reciclado Plástico | Compra de materiales post-consumo y postindustriales para ser reciclados y reintegrados en el proceso productivo. | | | | |
| | | Manufactura Aditiva | Elaboración de objetos mediante la adición de material, (Impresión 3D). | | | | |
| 3 | Empresa de apoyo | Empresa manufacturera | Produce y comercializa filamentos de PLA para impresión 3D. | Aporta conocimiento y materiales reciclables. | 6 | Obtiene información, caracterización de su producto y posibles recomendaciones. | 3 |
| 4 | Ministerios | Minambiente | Gestiona en función de la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la nación [13]. | Promueven e incentivan mediante políticas y programas la innovación y el desarrollo sostenible. | 1 | Diseño de procesos que permiten reutilizar material reciclable, reduciendo la contaminación en el medioambiente. | 3 |
| | | Minciencias | “Ente rector del Sector de Ciencia, Tecnología e Innovación del país con el cual se busca generar capacidades, promover el conocimiento científico y tecnológico, así como contribuir al desarrollo y crecimiento del país” [14]. | | | | |
| 5 | Entidades reguladoras | DANE | Entidad responsable de la planeación, levantamiento, procesamiento, análisis y difusión de las estadísticas oficiales de Colombia [15]. | Proporcionan información relevante para el desarrollo del proyecto. | 3 | Promover el desarrollo sostenible y reducir el impacto ambiental del plástico. | 2 |
| | | Acoplásticos | Entidad gremial colombiana, que reúne y representa a las empresas de las cadenas productivas químicas, que incluyen las industrias del plástico [16]. | | | | |
| 6 | Equipo de proyecto de diseño | Bio 3D | Actores principales en la realización del proyecto. | Estudio, diseño y análisis de los procesos para el aprovechamiento de materiales reciclables. | 9 | Aplicación y adquisición de conocimiento y experiencia en la elaboración del proyecto. | 4 |
| | | Director y Codirectora del Proyecto de diseño | Brindan asesoría y guía en el proyecto de diseño. | | | | |
| 7 | Pontificia Universidad Javeriana Cali | Facultad de ingeniería y ciencias | División de la universidad a la que pertenece el equipo del proyecto. | Aporta recursos, conocimiento y requiere información del proceso y avance del proyecto. | 4 | Aplicación de los procesos y material diseñados. | 3 |
| | | Comunidad javeriana | Hace referencia a las divisiones, centros, profesores y estudiantes pertenecientes a la universidad. | | | | |

Para priorizar los grupos de interés se suman los puntajes obtenidos en los criterios de influencia e impacto y según esto se establece el nivel de importancia en el proyecto. En el diagrama de Pareto que se muestra en la Fig.4, los grupos de interés están organizados de izquierda a derecha según la prioridad y denotados con la numeración de la TABLA I, de esta manera los clientes, equipo de proyecto, empresa de apoyo e industria son los más relevantes para el proyecto acumulando un 74% en nivel de importancia, el porcentaje restante corresponde a la Pontificia Universidad Javeriana, entidades reguladoras y ministerios considerados menos relevantes, pero aun pertinentes.

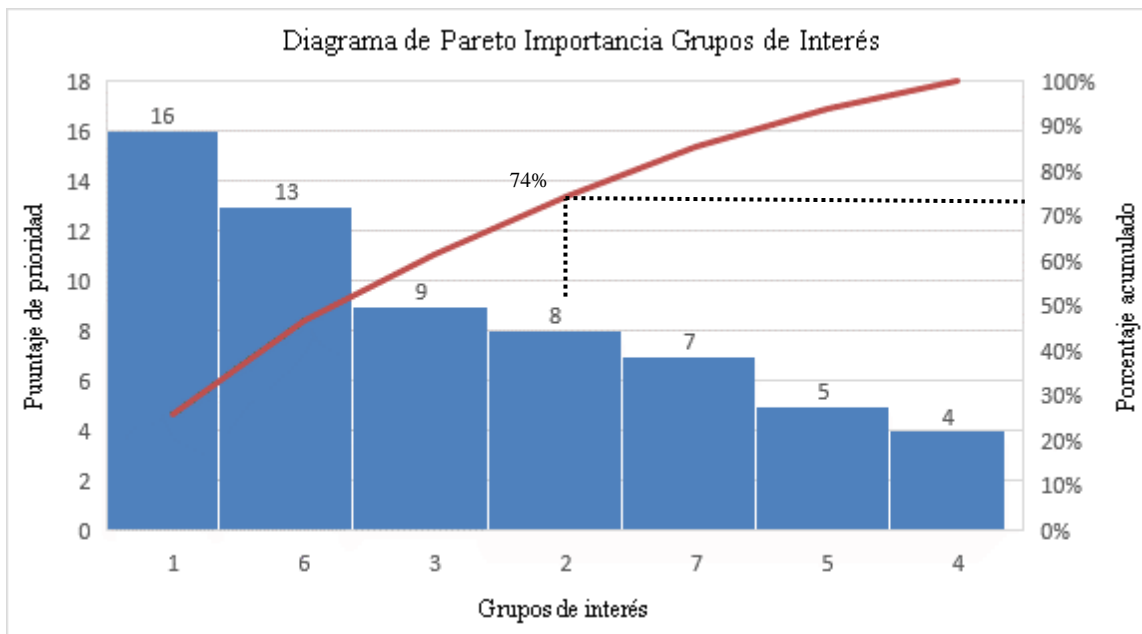


Fig. 4. Diagrama de Pareto definición de importancia de grupos de interés.

La matriz Influencia vs Impacto que se plantea en la Fig.5, se divide en cuatro cuadrantes y clasifica de manera gráfica los grupos de interés dependiendo del nivel de importancia asignado por las puntuaciones de los criterios. Los clientes están ubicados en el cuadrante superior derecho con el mayor nivel de prioridad, atribuido a su alta influencia e impacto en el proyecto, puesto que se debe cumplir con las especificaciones de diseño que requieren, siendo los usuarios finales del material diseñado, en el cuadrante inferior derecho están el Equipo de proyecto que lidera y se encarga del desarrollo del proyecto y la Empresa de apoyo que aporta información, materiales y puede ser posiblemente beneficiada; son los grupos con los que se trabaja conjuntamente y de forma activa dándoles una alta influencia, pero no tienen suficiente capacidad para modificar de manera significativa los lineamientos del proyecto debido a su bajo impacto. En el cuadrante superior izquierdo están las industrias las cuales no están involucradas directamente, pero las fluctuaciones de sus actividades puede modificar considerablemente el desarrollo del proyecto, por este motivo nunca deben ser ignorados, el ultimo cuadrante es el inferior izquierdo, en este se encuentran la Pontificia Universidad Javeriana, ministerios y entidades reguladoras, que se encargan de suministrar información y realizar seguimiento a los procesos, el conocimiento sobre el proyecto es moderado, teniendo en cuenta que su influencia e impacto son bajos.

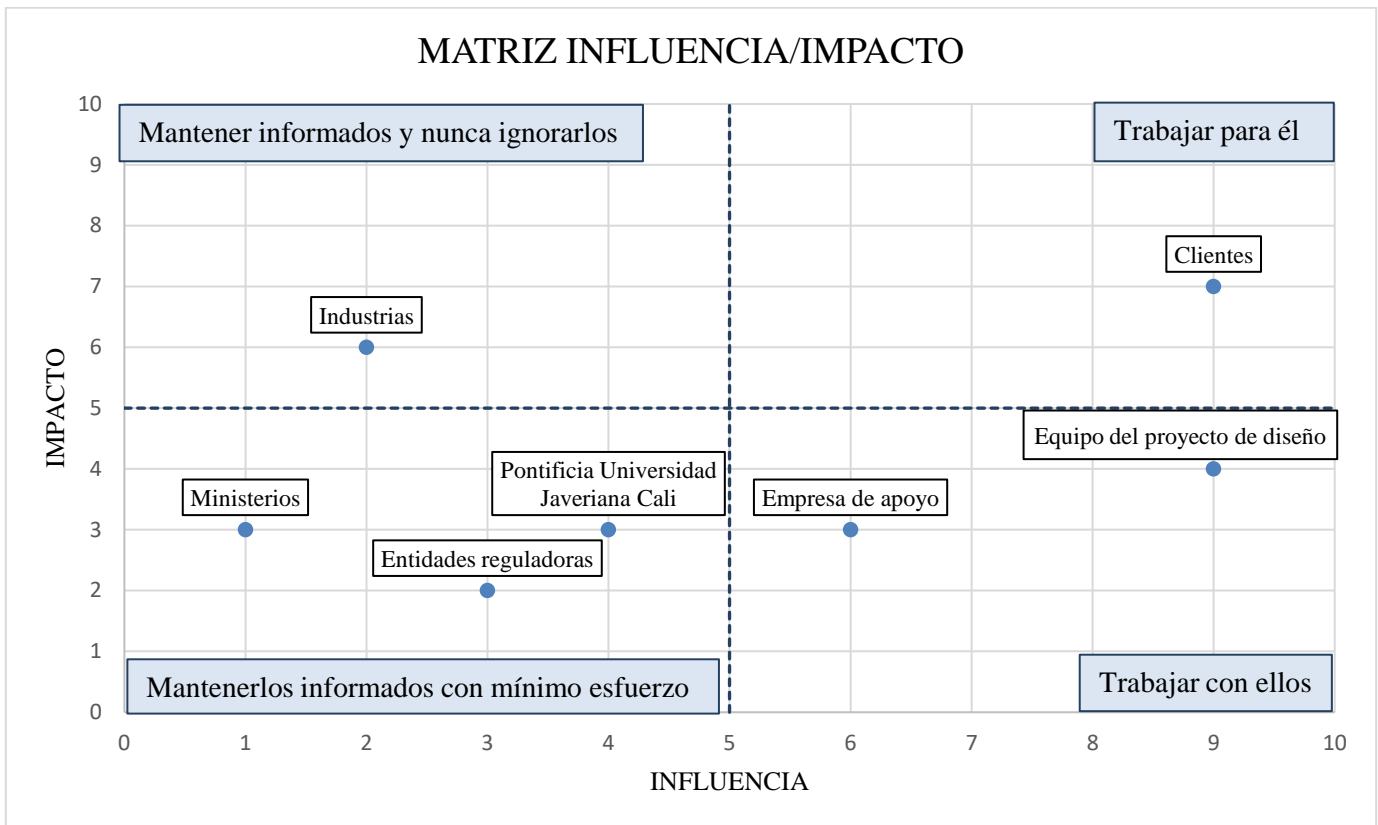


Fig. 5. Matriz Influencia/Impacto para grupos de interés.

C. Requerimientos

Con base de las partes interesadas del proyecto, se pudieron establecer las necesidades y delimitaciones que deben aparecer en el momento del diseño del producto final, dichas delimitaciones pueden abarcar desde aspectos económicos y físicos, hasta legales. Por otra parte, el establecimiento de los requerimientos se realizará teniendo en cuenta las prioridades establecidas en la matriz influencia-impacto anteriormente descrita.

Para definir los requerimientos de los grupos de interés, se contó con el apoyo del dueño de una empresa relacionada a la MA, la cual brindó información acerca de las expectativas que poseen los productores de filamentos para impresiones 3D, además de facilitar información de las diferentes comunidades que se ven beneficiadas de la implementación de esta tecnología. Para complementar la información con respecto a las industrias de plástico y otras instituciones, se acudió a fuentes secundarias las cuales permitieron completar las necesidades de los grupos de interés (ver anexo 1).

Por último, cabe resaltar que debido a que se espera implementar un porcentaje de material reciclado en la producción de los filamentos, una de las especificaciones y restricciones principales del diseño, es que posea propiedades físicas y térmicas similares a los materiales que se usan actualmente en la manufactura aditiva, y establecer las posibles limitaciones al implementar los residuos. Todo esto, se puede encontrar resumido en la TABLA II donde se encuentran los grupos de interés con sus debidos requerimientos y el marco legal el cual se rige en aquellas entidades.

TA BLA II.
REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS

| GRUPOS DE INTERÉS | | VoC (REQUISITOS GRUPOS DE INTERÉS) | RESTRICCIONES DE DISEÑO | ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | LEYES, NORMAS Y ESTÁNDARES | |
|-------------------|--|---|---|---|--|---|
| | | | | | Legislación y Requisitos Aplicables | Importancia o Efecto |
| Clientes | Empresas productoras de filamentos para impresión 3D | Desarrollar filamentos para impresión 3D cumpliendo la demanda del cliente | Cantidad de residuos disponibles no suficientes para satisfacer la demanda de los clientes. | El material para fabricar e implementarse debe poseer características particulares las cuales permitan su proceso en las impresoras 3D. | Norma UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020. Artículo 1.3.14.4 Decreto 1625 de 2016. | Establece todos los requisitos, pautas y recomendaciones que se deben tener a consideración para utilización de tecnología 3D para cualquier clase de producto. Control en el interior de un proceso y/o a la finalización, con el fin de implementar un sistema de monitoreo ambiental. |
| | Usuarios de impresora 3D | Buena funcionalidad de las diferentes alternativas de material para la elaboración de diseños específicos. | Restricciones en las propiedades físicas o térmicas para la elaboración de los diseños correspondientes. | El material reciclado ya sea en su respectivo porcentaje o totalidad, debe obtener propiedades físicas, mecánicas y térmicas similares al del material puro. | Norma UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020. | Establece todos los requisitos, pautas y recomendaciones que se deben tener a consideración para utilización de tecnología 3D para cualquier clase de producto. |
| Industria | Plástico | Dar utilidad a materiales plásticos de un solo uso desechados, disminuyendo así los residuos sólidos producidos por las industrias. | Limitaciones en los diferentes polímeros siendo no aptos para uso en la producción del filamento para impresión 3D Condiciones de los desechos plásticos que no involucren un incremento en los costos para su recuperación. | El filamento debe poseer en su porcentaje de composición una parte de material reciclado con una parte de material puro. | Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible. | Orientar cambios en los sistemas de producción y consumo con el fin de alcanzar la sostenibilidad ambiental. |
| | Reciclado Plástico | Generar un valor añadido a los desechos plásticos producidos, reintegrando el material a las cadenas de producción de nuevos productos. | Condiciones de los materiales transformados que no implique un incremento en los gastos para su recuperación. | El porcentaje de incorporación de los residuos a la cadena de producción debe ser mayor al porcentaje actual de dichos elementos. | Decreto 495 del 2016. | Instrumento de planeación distrital, donde mediante objetivos, proyectos y actividades se hará una gestión integral de los residuos sólidos. |
| | Manufactura Aditiva | Implementar nuevos materiales en el uso para producir artículos, piezas o productos. | Interés en añadir material reciclado en los procesos de manufactura mediante impresión 3D actuales. | Debido a las posibles limitaciones del material por el compuesto de polímeros reciclados, se deben especificar las restricciones con respecto a las propiedades físicas o térmicas del filamento. | Norma UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020. | Establece todos los requisitos, pautas y recomendaciones que se deben tener en consideración para utilización de tecnología 3D para cualquier clase de producto. |
| Empresa de apoyo | Empresa manufacturera | Diseñar un producto que cumpla con las diferentes propiedades físicas y térmicas adecuadas para su producción. | Los costos del proceso de reciclado, por su recuperación pueden ser elevados dependiendo del tipo de polímero a usar. | El material debe cumplir con los propósitos y objetivos de la empresa, además de generarle un beneficio ya sea económico, productivo o en otro aspecto. | Artículo 1.3.14.4 Decreto 1625 de 2016. | Control en el interior de un proceso y/o a la finalización, con el fin de implementar un sistema de monitoreo ambiental. |

| GRUPOS DE INTERÉS | | VoC (REQUISITOS GRUPOS DE INTERÉS) | RESTRICCIONES DE DISEÑO | ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | LEYES, NORMAS Y ESTÁNDARES | |
|---------------------------------------|---|--|---|---|--|--|
| | | | | | Legislación y Requisitos Aplicables | Importancia o Efecto |
| | | Viabilidad económica del proyecto, donde el costo de reciclaje sea menor que los ingresos obtenidos por el producto. | El polímero a usar no es apto para el reprocesamiento en la producción del filamento para impresión 3D. | | | |
| Ministerios | Minambiente | Gestionar las normativas referentes a la protección y cuidados del medio ambiente. | Normas que regulen los residuos producidos por las industrias de plástico. | Elaborar un proceso de gestión eficiente, para controlar los posibles impactos ambientales en la elaboración del filamento. | Ley No. 1523 del 2012. | Se adopta la política nacional de gestión de riesgos, además de establecer el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres. Se hace creación del ministerio de ambiente el cual es la entidad encargada de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos renovables. |
| | Minciencias | Gestionar las normativas referentes al desarrollo, innovación e investigación del país. | Normas que regulen la reintegración de residuos en la cadena de producción. | Acatamiento de normas con respecto a actividades científicas y tecnológicas. | Ley No. 99 de 1993. | Se dictan normas para la asociación de actividades científicas y tecnológicas, proyectos de investigación y creación de tecnologías. |
| Entidades reguladoras | DANE | Elaborar, planear y evaluar diversos informes estadísticos a nivel nacional siendo soporte de las problemáticas internas del país. | Carencia de información relacionada con el tema del proyecto. | N/A | Ley 82 de 1935. | Se consolida la entidad reguladora con el fin de generar datos estadísticos acerca de los sectores, industrias, etc., del país. |
| | Acoplásticos | Plantear estrategias para el desarrollo sostenible de las industrias que representa. | Buena praxis sobre la reglamentación de los materiales a implementar en el proceso de empaque y embalaje. | N/A | CONPES 3874 de 2016. | Implementación del concepto economía circular, previniendo así la generación de residuos. |
| Equipo del proyecto de diseño | Bio 3D | Aplicar los conocimientos adquiridos con el fin de determinar una alternativa a una problemática actual. | Comprensión de los diferentes conceptos fundamentales para la elaboración de filamentos 3D a base de polímeros. | Implementar todos los componentes para desarrollo del proyecto de la metodología DMADV. Viabilidad del proceso de producción de filamentos para impresión 3D a partir de residuos sólidos reciclables. | Numeral 108 del Reglamento de Estudiantes de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. | Se le notifica al estudiantado la posibilidad de la realización de un proyecto del grado el cual será considerado para la culminación del programa académico, clarificando que esta se deberá sustentar de forma oral y escrita. |
| | Director y Codirectora del Proyecto de diseño | Brindar información pertinente acerca de temas que puedan presentar un desafío para el estudiantado. | N/A | Revisión de los diversos conceptos acerca de propiedades físicas, térmicas y de validación de viabilidad económica del proyecto. | Acuerdo 263 del 11 de octubre de 2000 Reglamento del Profesorado | Reglamenta los derechos y deberes del profesorado, incluyendo su asesoramiento en materia de investigaciones o trabajos de grado. |
| Pontificia Universidad Javeriana Cali | | Validación del aprendizaje por parte del estudiando, | Cumplimiento de todas las normas de escritura, pautas técnicas y formatos | N/A | N/A | N/A |

| GRUPOS DE INTERÉS | VoC (REQUISITOS GRUPOS DE INTERÉS) | RESTRICCIONES DE DISEÑO | ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | LEYES, NORMAS Y ESTÁNDARES | |
|-------------------|---|---|-------------------------------|---|----------------------|
| | | | | Legislación y Requisitos Aplicables | Importancia o Efecto |
| | obteniendo un proyecto con un impacto positivo y justificado. | establecidos para la correcta elaboración del proyecto de diseño. | | | |

III.MEDIR

A. Plan de recolección de datos

La recolección de datos es un proceso de relevancia para el desarrollo del proyecto debido a que permitirá identificar, gracias a los requerimientos establecidos mediante el VoC por parte de los grupos de interés, las variables representativas que lograrán satisfacer las expectativas de los anteriores mencionados. Con el fin de cumplir dichos requisitos se añadieron indicadores de desempeño los cuales permitirán cuantificar y realizar un análisis entre las características y variables del filamento a diseñar en comparación a los valores que presentan los filamentos producidos actualmente en el mercado.

Debido a que este proyecto se encuentra enfocado en el sector de la manufactura aditiva, se realizó el contacto con una empresa productora de filamentos de impresión 3D. Mediante una encuesta (ver anexo 2), la empresa brindó información acerca del proceso de producción de los filamentos para las impresoras 3D, una contextualización de la importancia de las especificaciones del producto (filamento), que tendrá impacto en el uso final y el diseño del producto a imprimirse; por último, la empresa brindó información acerca del control de calidad que esta realiza durante la elaboración del producto con el fin de satisfacer las necesidades de los consumidores.

Para la definición de las propiedades mecánicas del material se acudirán a fuentes primarias de información, en este caso el equipo de trabajo realizará diferentes ensayos de laboratorio con el fin de determinar dichos valores. Cabe resaltar que el proceso de medición de los datos se hará una vez definido el material en la etapa de analizar; en este caso, para definir el tipo de material plástico apropiado se tendrán en cuenta los criterios que se consideren pertinentes para el proyecto. Una vez definido el material plástico, se procederá a realizar la caracterización de un filamento de impresión 3D a base del material especificado. Los valores meta establecidos para las propiedades mecánicas del material, se obtendrán las propiedades del polímero virgen (ver anexo 3) y la medición de las propiedades de los filamentos con composición únicamente de material virgen del plástico seleccionado, esto mediante ensayos de laboratorio.

La tercera fuente de información es la proporcionada por la literatura y el estado de arte, se buscarán proyectos similares que permitan establecer las proporciones de material reciclado y virgen para evaluar en el desarrollo de este trabajo, con lo que se espera encontrar una proporción óptima para la generación de filamentos para impresión 3D, sin alterar de manera significativa las propiedades mecánicas y térmicas del producto.

En la TABLA III se muestran las variables y su relevancia en este proyecto, además del mecanismo de medición de las mismas. Esta tabla resume el plan de recolección de datos, que se usará en el desarrollo del proyecto. En el anexo 4 se presenta el plan de recolección de datos completo.

TABLA III.
INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR

| Variable | Objetivo | Descripción | Indicador |
|---|--|--|--|
| Eficiencia del reciclado | Definir el porcentaje de aprovechamiento de residuos post-industriales del polímero seleccionado. | Se mide con respecto al porcentaje de utilización de residuos en el proceso de diseño del filamento con respecto al total de residuos generados. | Porcentaje de aprovechamiento de residuos $\%Eficiencia = \frac{Kg \text{ de residuos usados}}{Total \text{ de residuos generados}} * 100$ |
| Resistencia máxima a la tensión | Definir la magnitud de esfuerzo necesario a la cual se somete el material previamente de romperse al ser halado. | Se realizará la medición mediante un ensayo de tracción, donde se someterá una probeta a fuerzas de tensión, la magnitud final será la obtenida previamente antes del que material se rompa. | Capacidad de resistencia a la tensión $\sigma R = \frac{Fuerza \text{ maxima}}{Area \text{ inicial}}$ |
| Deformación a la rotura | Definir la deformación máxima a la cual se somete el material al ser estirado previamente de la rotura. | Se realizará la medición mediante un ensayo de tracción, donde se someterá una probeta a fuerzas de tensión, mediante la selección de puntos fijos, determinando el desplazamiento de estos. | Capacidad de deformación: $\epsilon = \frac{Longitud \text{ final} - Longitud \text{ inicial}}{Longitud \text{ inicial}}$ |
| Módulo de elasticidad | Definir la relación entre el esfuerzo y la deformación en la zona elástica | Mediante los valores obtenidos en el ensayo de tracción, se realizará la relación entre el esfuerzo y la deformación en la zona elástica. | Rigidez del material: $E = \frac{Resistencia \text{ maxima a la tensión}}{Deformación \text{ a la rotura}}$ |
| Resistencia a la flexión | Determinar la resistencia del material ante una carga estática o aplicada lentamente.. | Se basa en la aplicación de fuerza en el centro de una barra que tiene soporte a cada extremo. | Capacidad de resistencia la flexión $\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$ Donde σ momento de fallo, F fuerza en el punto de fractura, L longitud del tramo de soporte, b anchura, d espesor. |
| Resistencia térmica | Definir la estabilidad térmica del material, en función de su temperatura de fundición y la de descomposición. | Mediante una calorimetría diferencial de barrido, se obtendrá las temperaturas de fusión y de transición vítrea del material. | Temperatura de fusión: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ Donde ΔG es la energía libre de Gibbs, ΔH la entalpia y ΔS la entropía. |
| Relación de mezcla de material virgen y reciclado | Proporción entre el material puro y el material reciclado con el fin de obtener tener la mezcla óptima. | Se mide mediante la relación de la cantidad de material reciclado utilizado en la producción del filamento sobre el total de material tanto reciclado como virgen utilizado | Proporción de material reciclado: $\%Mezcla = \frac{Kg \text{ de material reciclado}}{Total \text{ de Kg utilizados}} * 100$ |
| Costo de reciclaje | Se debe buscar el costo mínimo por parte del reciclado del material, debido a su recuperación y limpieza para posteriormente hacer uso de él. | Se realizará la suma de los diferentes costos que se presenten a lo largo de la recuperación de los residuos para la producción del filamento. | Costos del material reciclado: $Costo \text{ Total} = Costo \text{ de recuperacion por Kg}$ |
| Utilidad del producto | Analizar viabilidad económica del proyecto debido a que las empresas productoras del filamento deben obtener una ganancia económica en la implementación del producto. | Se calcula como la diferencia entre el posible valor del producto final menos todos los costos que se involucraron para el desarrollo del filamento. | Margen bruto por producto: $Utilidad = Precio \text{ de venta} - Costos \text{ del producto}$ |

B. Exploración del mercado

En esta etapa se realizó un estudio de los diferentes aspectos que influyen en el desarrollo del proyecto, recolectando información clave que permitió identificar el estado actual del entorno en el cual tiene aplicabilidad el proyecto, y con ello, tomar decisiones para su correcta implementación en el mercado.

Con el fin de conocer el proceso de diseño de un filamento para impresión 3D se utilizó la herramienta SIPOC que se observa en la Fig.6, sus siglas en inglés hacen referencia a proveedores, entradas, proceso, salidas y clientes, también se clasificó en un ciclo PHVA, delimitando los actores, recursos y resultados que intervienen directamente en el desarrollo del filamento en cada etapa.

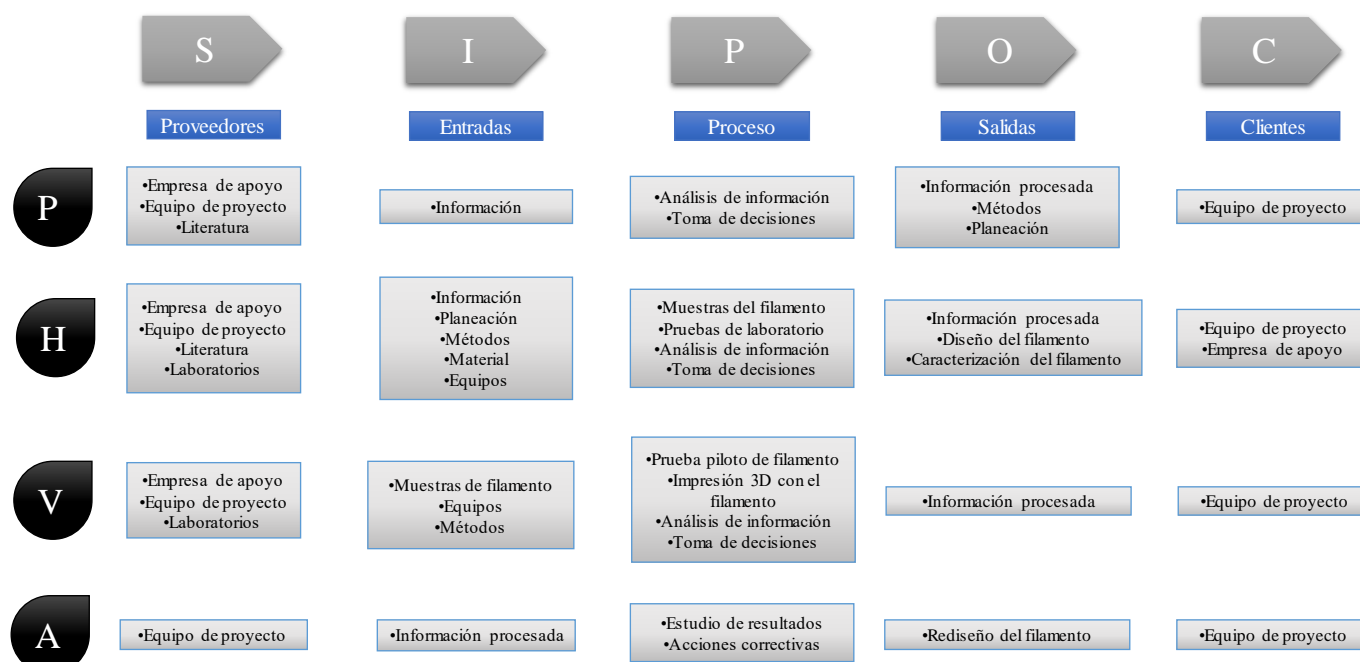


Fig. 6. SIPOC del proceso de diseño de filamento para impresión 3D.

Como se puede observar en el SIPOC los principales actores en el proceso de diseño es el equipo de trabajo del proyecto, debido a que son los encargados de obtener, procesar y utilizar los recursos, siendo tanto proveedores como clientes, también un actor importante es la empresa de apoyo, la cual es un contacto directo con la industria de la manufactura aditiva y proporcionará la información y los materiales necesarios para el desarrollo del proyecto.

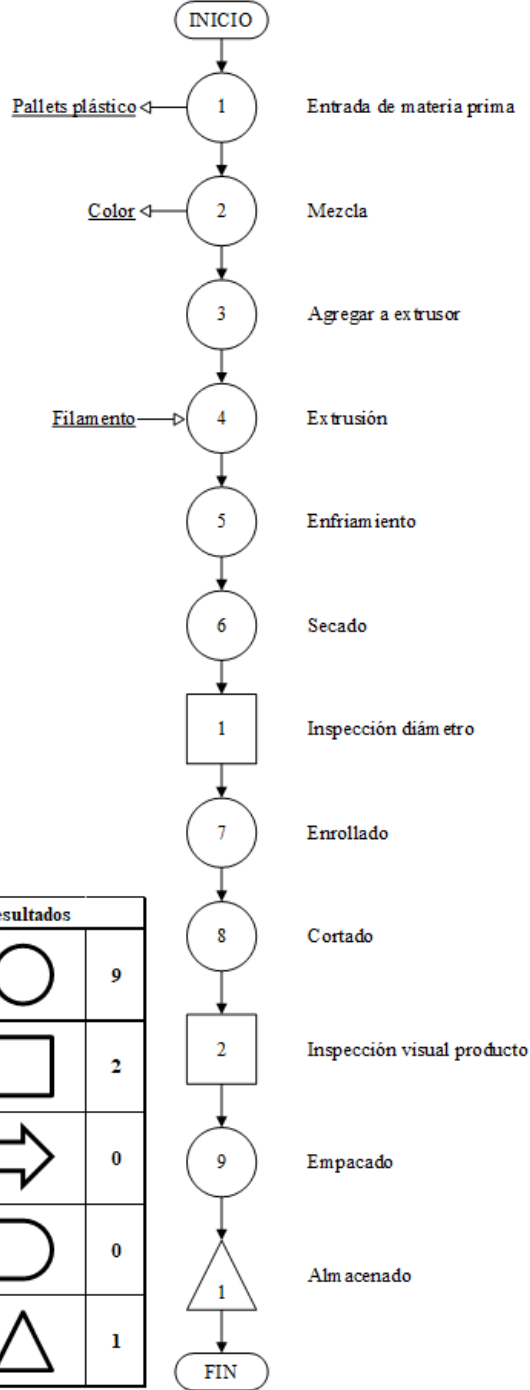
Anteriormente, en la sección de grupos de interés, se identificaron los clientes potenciales que hacen referencia a las fábricas manufactureras de filamento para impresión 3D y usuarios de impresoras 3D; primero se realizó un análisis a una empresa que produce filamento de PLA (ácido poliláctico), a través de una entrevista con el propietario (ver anexo 2). Con la información proporcionada se establecen aspectos claves y beneficios para el proyecto, en el diagrama de flujo de la Fig.7, se muestra el proceso de fabricación del filamento según las fuentes consultadas, con el fin de establecer un método de producción y posibles fuentes de residuos de plástico.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D

Realizado por: Bio 3D

Fecha: octubre 21 de 2020

Método: Actual



| Resumen de resultados | | |
|-----------------------|---|---|
| Operaciones | ○ | 9 |
| Inspecciones | □ | 2 |
| Transportes | ➔ | 0 |
| Esperas | D | 0 |
| Almacenamientos | △ | 1 |

Fig. 7. Diagrama de flujo de producción de filamento para impresión 3D.

En el proceso de fabricación del filamento según las fuentes consultadas, se producen diferentes tipos de residuo, primero están los residuos generados por el cambio de color, debido a que se elabora un filamento que sale con colores combinados, la finalidad es limpiar los equipos, esto se hace hasta que dé como resultado el color esperado, estos residuos son recolectados en contenedores según su color. Otras de las fuentes de residuos son los filamentos que pasan por una galga y exceden el diámetro de 1,75 milímetros, provocando que el filamento se rompa. Se tiene en consideración otro tipo de residuos, el cual es el producto rechazado por parte de los clientes al presentar defectos de fábrica.

Otra fuente de residuos que se identificó, se da en el momento en que el consumidor de filamentos realiza la impresión de piezas, donde se generan residuos por fallas en la impresión, debido a inexperiencia o errores en la impresora 3D. Aquí, también habrá residuos debido a los soportes necesarios en la fabricación de muchas de las geometrías requeridas, que posteriormente son retirados y desechados. Con lo anterior se evidencia las diferentes fuentes de generación de residuos plásticos que son desechados en la fabricación de filamentos e impresión 3D, y que podrían ser aprovechados para la producción del filamento con material reciclado.

Debido a que el segmento de mercado a analizar es reducido no se realizó encuestas con rigor estadístico, pero con el objeto de establecer características representativas del nicho de mercado, se optó por realizar un sondeo mediante la recolección de información a través de entrevistas virtuales a consumidores de filamento para impresión 3D en Colombia (ver anexo 5), con el fin de determinar cuáles son los materiales preferidos, permitiendo así aproximar el estado actual del mercado de filamentos. En primer lugar, se identificó que el filamento de PLA es el de mayor consumo por parte de los clientes, seguido por el PETG y ABS el cual tienen una preferencia similar. Por último, se puede observar que los filamentos de PC (Policarbonato) y Nylon, son los menos atractivos para los usuarios. Esta información se encuentra graficada en la Fig.8

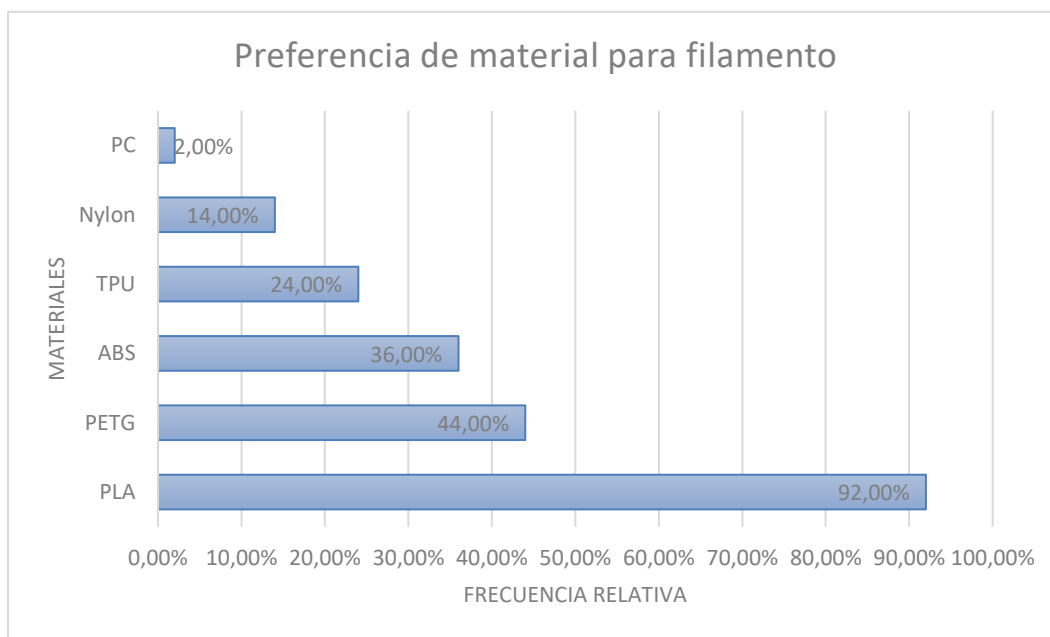


Fig. 8. Preferencia de consumidores por material para filamentos de impresión 3D.

Continuando con lo anterior, se debe conocer las características de los materiales teniendo en cuenta aspectos como la finalidad de las piezas a imprimir, precio, ventajas y desventajas. En la TABLA IV se puede evidenciar información relevante de los filamentos más comunes mencionados anteriormente, con el objeto de establecer posibles factores decisivos que se tendrían en cuenta al momento de elegir un material.

TABLA IV.
CARACTERÍSTICAS DE FILAMENTOS MÁS COMUNES SEGÚN MATERIAL [17]

| Plástico | Composición | Medio ambiente | Utilización | Favorable | Desfavorable | Precio mínimo COP/ 1Kg | Precio máximo COP/1Kg |
|----------|---|--|---|---|--|------------------------|-----------------------|
| ABS | Petróleo | No es biodegradable y al fundir emana gases | Piezas móviles, carcasas, Instrumentos de música y juguetes. | Resistencia y durabilidad, capas de intervenir en mecanizado. | Punto de fusión alto y genera emanaciones que pueden ser irritantes | \$ 65.000,00 | \$ 135.000,00 |
| PLA | Almidón de maíz | Es biodegradable. | Objetos en contacto con alimentos como: cucharas, vasos, tazas, biberones, contenedores de agua, también juguetes y esculturas. | No necesita calentar la base y el precio es el más barato entre muchas referencias. | No es tan resistente como otros materiales, no se puede utilizar a nivel mecánico industrial y es muy complicado de reciclar | \$ 60.000,00 | \$ 150.000,00 |
| TPU | Plástico con base de poliuretano y caucho | Es reutilizable | Juguetes, correas de tracción, ruedas, accesorios elásticos, bisutería y decoración. | Material elástico, muy resistente a la fricción | Precio alto | \$ 125.000,00 | \$ 160.000,00 |
| Nylon | Petróleo y Polímero Sintético | No es biodegradable | Al tener poca contracción es ideal para piezas grandes o ensamblados. | No produce olores y humos al imprimir | Muy inflamable y propenso al warping | \$ 125.000,00 | \$ 235.000,00 |
| PET | Petróleo y poliéster | No es biodegradable, aunque si es reciclable | Botellas de agua, contenedores de líquidos, Buen material para realizar piezas mecanizadas. | Resistencia y durabilidad | Genera emanaciones que pueden ser levemente toxicas | \$ 75.000,00 | \$ 125.000,00 |

Para analizar el estado actual de la impresión 3D a nivel mundial se toma como referencia el estudio realizado por la empresa Sculpteo, líder mundial en producción digital, mediante una encuesta realizada en el año 2020 a más de 1.600 personas de 71 países; la información presentada en el estudio es de utilidad para identificar y segmentar el mercado al que se dirigirá el proyecto.

Según este estudio, el 71% de los encuestados han aplicado la impresión 3D por más de tres años; por otro lado, el 62% tienen conocimientos en ingeniería y el 31% aplica la impresión 3D a diario lo cual implica que se trata de un grupo de personas con experiencia en el campo. En cuanto a los motivos por los que se utiliza impresión 3D corresponden a trabajo (59%), pasatiempo (24%) y educación (17%); el rango de edades más común que da uso a esta tecnología se encuentra entre 25 a 34 años como indica la Fig.9, representando un 40% de los encuestados. Teniendo en cuenta lo anterior se establece un perfil demográfico con respecto a las aplicaciones y edades [18].

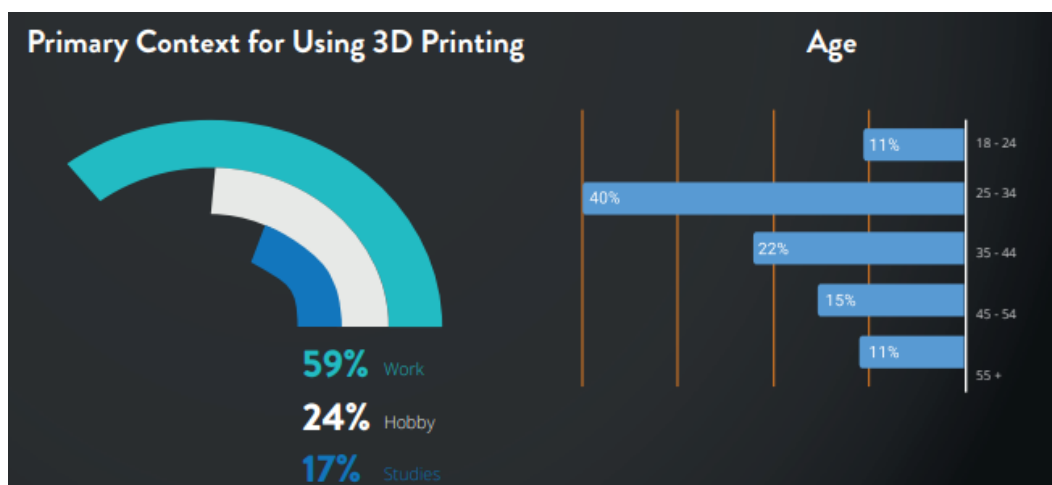


Fig. 9. Contexto para el uso de impresión 3D [18].

Los datos de la fuente reflejan un aspecto favorable para el proyecto: Uno de los factores de mayor importancia son los suministros y costo de materiales, además de la preferencia a utilizar productos plásticos plasmado en la Fig.10. Lo anterior evidencia una posible oportunidad en cuanto a diseñar un material a base de plástico confiable y de bajo costo para impresión 3D, uno de los objetivos del proyecto [18].

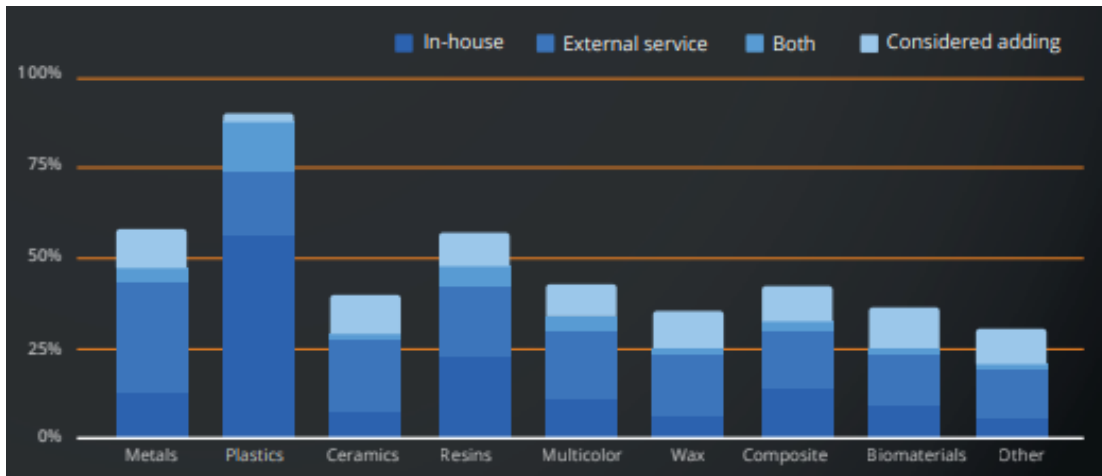


Fig. 10. Materiales usados en impresión 3D [18].

Para evaluar las condiciones del entorno se realizó un análisis político, económico, social, tecnológico, ambiental y legal (PESTEL por sus siglas en ingles); dado que es necesario identificar factores externos que afecten de manera positiva o negativa la finalidad del proyecto (ver anexo 6); En la Fig.11, se presenta un copilado con los aspectos más relevantes del análisis.



Fig. 11. Análisis PESTEL entorno manufactura aditiva.

Como resultado del análisis externo con la metodología PESTEL, las condiciones del proyecto resultan favorables debido a el aprovechamiento de residuos plásticos encaminado al desarrollo sostenible y una tendencia en el aumento de interés e inversión en nuevas tecnologías por parte de diferentes industrias y el estado. No obstante, existe incertidumbre en cuanto a las regulaciones debido a que la impresión 3D es una industria nueva y aún no cuenta con normativas que controlen las acciones en torno a esta tecnología.

Teniendo en cuenta la información anterior se utiliza una metodología DOFA, con el fin de identificar las oportunidades, debilidades, fortalezas y amenazas, para plantear propuestas que permitan implementar el diseño del filamento en el mercado, como se muestra en la TABLA V

TABLA V.
ANALISIS DOFA DISEÑO DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D

| Factores externos | | |
|--|--|---|
| Oportunidades | | Amenazas |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Interés por aprender y aplicar tecnologías de impresión 3D. 2. Apoyo por parte del gobierno en el desarrollo de la industria de manufactura aditiva. 3. Desarrollo de programas para fomentar el reciclaje. | | <ol style="list-style-type: none"> 1. Falta de políticas que regulen la manufactura aditiva. 2. Uso ilícito de la impresión 3D. 3. Altos impuestos en tecnología. 4. Problemas económicos mundiales a causa del COVID-19. |
| Factores internos | | |
| Fortalezas | Estrategias FO | Estrategias FA |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Apoyo de empresa manufacturera de filamentos. 2. Conocimientos sobre la producción de filamentos y piezas de impresión 3D. 3. Uso de materiales reciclados. 4. Disponibilidad de equipos y material. | <p>F3-O3. Dar a conocer el diseño como producto a base de material reciclado.</p> <p>F2-O1. Implementar el producto en entornos de innovación y desarrollo.</p> <p>F4-O1. Ofrecer beneficios como la caracterización de su producto a la empresa de apoyo.</p> | <p>F2-A1, A2. Fomentar el uso adecuado del filamento en la impresión 3D.</p> |
| Debilidades | Estrategias DO | Estrategias DA |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Pruebas de laboratorio costosas. 2. Desconocimiento de factibilidad económica. 3. Escases de información sobre manufactura aditiva en Colombia. 4. Perspectiva desfavorable de uso de materiales reciclados. | <p>D3-O1, O2. Presentar información sobre las propiedades del filamento diseñado.</p> <p>D4-O1. Presentar muestras del uso del filamento en impresión 3D.</p> <p>D3, D4-O1, O2. Realizar un análisis de los posibles beneficios que puede tener la implementación del diseño.</p> | <p>D1, D3-A3, A4. Formular un diseño de filamento, basado en investigación y reducir las opciones para minimizar el número de pruebas de laboratorio.</p> |

Con respecto a los resultados de los indicadores de desempeño, como se mencionó en el plan de recolección de datos, los valores de las diferentes propiedades mecánicas que se tendrán en consideración se medirán en cuanto se haga selección del plástico el cual será utilizado en el diseño del filamento; esto debido a que es necesario realizar probetas para los diferentes ensayos para definir las propiedades del material (metas). Por otro lado, el porcentaje de mezcla de material reciclado y virgen se definieron a partir del estado del arte de trabajos similares [19], la eficiencia del reciclado se caracterizó según el decreto 2412 del 2018 el cual establece el aprovechamiento actual de los diferentes residuos generados. Debido a que el proyecto a su vez debe poseer un interés económico, se buscara minimizar los costos de recuperación del material reciclado, con el fin de que la utilidad económica del producto sea alta, todo esto se encuentra sintetizado en la TABLA VI.

TABLA VI.
RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

| Variable | Actualidad | Indicadores | Meta |
|---|---|---|---|
| Eficiencia del reciclado | 8.3% de aprovechamiento de material reciclado. | Porcentaje de aprovechamiento de residuos | Alcanzar mínimo el 10% de aprovechamiento de residuos post-industriales. |
| Relación de mezcla de material virgen y reciclado | No se realizan filamentos con mezcla de material reciclado y virgen. | Proporción de material reciclado | Superar el 10% de material reciclado según el estado del arte. |
| Costo de reciclaje | Debido a que no se realiza uso de material reciclado en la producción de filamentos, no existe un costo actual. | Costos del material reciclado | Minimizar los costos de recuperación de material en el mayor valor posible. |
| Utilidad del producto | Debido a que no se realiza uso de material reciclado en la producción de filamentos, no existe un valor de la utilidad económica. | Margen bruto por producto | Al relacionarse con los costos de recuperación se buscará minimizar los costos con el fin de así obtener la mayor utilidad posible. |

IV. ANALIZAR

A. Análisis de Oportunidad

Después de haber realizado en la etapa anterior un acercamiento al mercado de los filamentos para impresión 3D y su uso en la manufactura aditiva, es necesario establecer las oportunidades y dificultades que se pueden presentar en la inserción de un nuevo producto a base de material reciclado.

Con respecto a las oportunidades para el desarrollo del filamento se ha visto un incremento en el uso de esta tecnología con diversas aplicaciones tanto académicas como decorativas. Esta información se ve reflejada en la Fig.12, donde la mayoría de encuestados por la empresa Sculpteo aceptaron hacer uso de la impresión 3D para el diseño de prototipos. A causa de la implementación de material reciclado y debido a las alteraciones en la estructura del polímero, se tendrán limitaciones en los posibles diseños que se generen a partir del filamento.

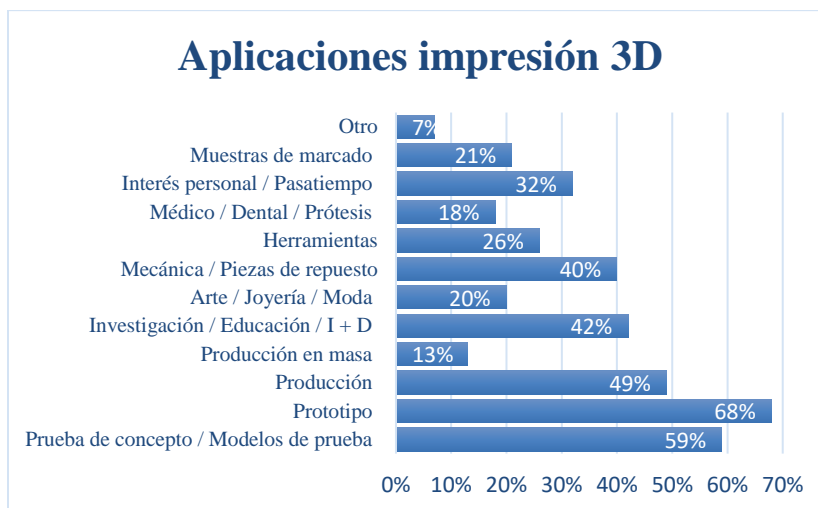


Fig. 12. Aplicaciones de la impresión 3D
Modificado de: [18].

Adicionalmente a lo anterior, la empresa Sculpteo a sus entrevistados les consultó los desafíos a los cuales se debía enfrentar la industria de la manufactura aditiva con el fin de continuar expandiéndose. La respuesta por parte de los usuarios se encuentra

presentada en la Fig.13, donde la necesidad de implementar nuevos materiales para la generación de diseños y la necesidad de desarrollar tecnologías y materiales sostenibles se encuentran altamente ligados con los objetivos del proyecto de generar el diseño de un filamento para impresión 3D a base de material reciclado; además, de la posibilidad de darle un valor económico añadido a los plásticos de un solo uso, posteriormente de haber sido procesados.

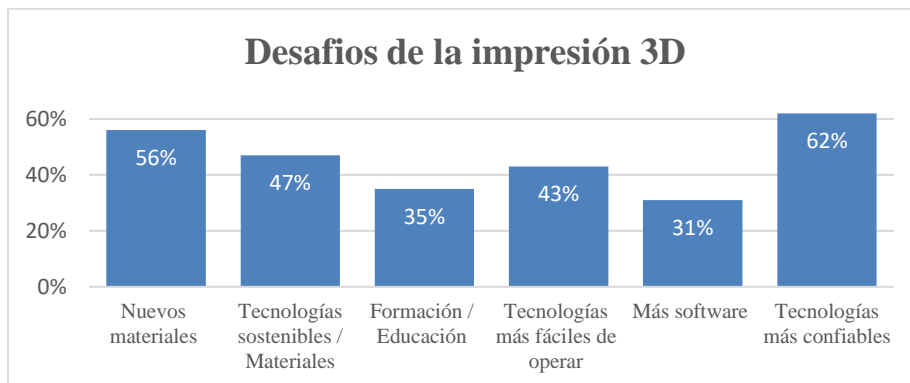


Fig. 13. Necesidades de la industria de impresión 3D
Modificado de: [18].

A fin de determinar los requisitos críticos de las partes interesadas del proyecto se definió controladores de requerimientos críticos six sigma (CTx), los cuales tendrán repercusiones en el diseño final del filamento de material reciclado. Dichos controladores se establecieron mediante la información recolectada en los requerimientos por parte de los grupos de interés determinados en la etapa Definir. A su vez, dichos requerimientos se compenetrarán con los indicadores de desempeños definidos en la etapa de Medir, considerando las estrategias que permitirán afrontar las situaciones internas y externas basadas en las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas del desarrollo del proyecto.

Para este proyecto, los controles críticos que se definieron para el proceso de elaboración del producto a base de material reciclado fueron referentes a calidad y costos. Con respecto al control crítico de calidad CTQ (Critical To Quality) del proceso, se obtuvo:

- Manejo adecuado de obtención de plásticos reciclados: Mediante el proceso de recuperación de plásticos se busca obtener una posible alternativa de uso; sin embargo, es necesario considerar aspectos de relevancia del manejo de los residuos los cuales permitirán controlar diversos aspectos como las propiedades del material. Algunos de estos aspectos son transparencia, limpieza del material, presentación y clasificación. Además, se debe considerar la procedencia del material debido a que, si el material plástico en su tiempo de vida ha sido sometido a varios ciclos de procesamiento, tendrá una disminución de sus propiedades mecánicas y térmicas [20].
- Proceso de reciclado: Después de haber obtenido los materiales reciclados, es necesario someter el plástico a un proceso de reciclado, el cual busca realizar una transformación de la forma del material sin generar un rompimiento en sus macromoléculas. Inicialmente se hace una limpieza superficial del material con el fin de eliminar impurezas, posteriormente, se hace una clasificación de los materiales mediante la cual se almacenan para su procesamiento y se realiza una limpieza a profundidad del material a través de tanques de agua fría o en agua caliente. Después de verificar que el material se encuentra sin imperfecciones se procede a triturar para obtener un tamaño adecuado para su manipulación [21].

Una vez obtenido el material picado, relacionado con los CTQ del producto, se procede a desarrollar el proceso de elaboración del filamento de impresión 3D donde se elaborarán diferentes proporciones de material reciclado y material virgen, para finalmente hacer una evaluación de las propiedades mecánicas del material obtenido mediante diferentes ensayos para así determinar y delimitar los posibles diseños a generar con el producto. Una forma de evidenciar la degradación de las propiedades de los materiales es mediante el índice de fluidez, el cual, mediante una disminución en su valor y en el peso molecular del polímero, indica una degradación del material [20].

Por el lado de los controladores críticos de costo CTC (Critical To Cost), es necesario la implementación con el fin de obtener un beneficio económico por la producción del filamento, haciéndolo de interés para las industrias actuales, viendo una oportunidad de mercado y un aprovechamiento de residuos. El controlador se definió de la siguiente manera:

- Viabilidad financiera en la producción del filamento: Una vez obtenido la relación de material reciclado con material virgen, además que sea posible el desarrollo de un filamento para impresión 3D, debe entrar en consideración los costos que entraron en el proceso de recuperación del material y los costos del proceso de producción del filamento; por ello a su vez, es importante la selección de un material, el cual en el proceso de recuperación y limpieza no incurra en un incremento de los costos del material. Una vez cuantificado los diferentes costos relacionados al proceso de producción se deberá establecer un precio razonable para el producto, el cual se debe encontrar en un valor moderado con respecto al precio de los filamentos de material virgen que se producen en la actualidad. Otra forma posible de representar una ganancia, no solamente económica para los productores, es en la consideración de ahorro de materia prima en la producción de sus filamentos o un posible uso de los desechos plásticos post-industriales.

Por último, se tiene los controladores críticos de satisfacción CTS (Critical To Satisfaction), los cuales están asociados a los requerimientos establecido por los posibles clientes del producto.

- Funcionalidad del producto: Es importante tanto para los productores como para los usuarios finales, que el material propuesto para la elaboración del filamento cuente con las especificaciones del producto, para ello se realizara una ficha técnica la cual indique la mezcla de plástico reciclado con material virgen, con las características obtenidas durante la prueba piloto.

Después de haber definido los controladores críticos para el proceso y el producto relacionados a los requerimientos de las partes interesadas, es necesario definir la mezcla de mercado (4 p's del marketing) para así definir la tendencia de oportunidad del mercado actual, esto a su vez ira ligado con la información recolectada en las etapas anteriores.

En relación a las 4 P's del marketing, inicialmente se informará acerca del producto. El proyecto tiene como objetivo evaluar la viabilidad del desarrollo y diseñar un filamento para impresión 3D con una composición de material reciclado y material virgen. Como se ha mostrado en la Fig.12, el sector de la manufactura aditiva debido a su crecimiento ha precisado la necesidad de obtener nuevos materiales, además, de generar alternativas sostenibles para la industria; por ello, desde un inicio se buscó el aprovechamiento de materiales plásticos que a su vez coinciden con los materiales empleados en los diseños de impresión 3D actuales. También es importante considerar que, al ser un producto el cual puede ser aplicado en diferentes industrias, su utilización podría ser alta.

Para la consideración del precio, como se ha mencionado anteriormente, el valor de adquisición para el producto debe de encontrarse en relación con el precio actual de los filamentos que se venden en el mercado de material puro, además, de entrar en consideración la inserción de material reciclado el cual podría implicar una reducción en el precio como incentivo para la adquisición por parte de los consumidores. No obstante, debido a que el proceso de producción incurrirá en costos adicionales para la recuperación del material plástico, se deberá considerar en el precio de venta. El precio será establecido en la etapa de análisis de viabilidad financiera.

Con respecto a la plaza o accesibilidad del producto, inicialmente es una propuesta la cual se encuentra enfocada para los productores de filamentos con uso en impresión 3D los cuales cuentan con la maquinaria y el conocimiento del proceso de producción de este producto en su forma de material puro. Sin embargo, posteriormente al haber analizado la viabilidad del producto, se desea establecer los requerimientos necesarios tanto de materia prima como de maquinaria para su elaboración, permitiendo así su posible producción para otras industrias relacionadas al plástico.

Finalmente, se tiene la promoción del producto. El desarrollo de este producto, se encuentra enfocado en un segmento de mercado específico, esto se debe a que en los últimos años aun cuando se ha ido mostrando un crecimiento en el uso de la impresión 3D para la elaboración de diferentes diseños, sigue siendo una tecnología la cual requiere una capacitación y determinadas condiciones para su uso. Por ello se busca presentar el filamento como una alternativa de reutilización de los residuos sólidos, incentivando el desarrollo de nuevos materiales bajo condiciones de sostenibilidad ambiental.

De esta manera, mediante la información recolectada en la exploración de mercado y plasmada en el DOFA, donde la manufactura aditiva se encuentra en una etapa de desarrollo e inserción en la cultura colombiana, además de la posibilidad de

obtener una alternativa para los residuos plásticos de un solo uso, se encuentra una oportunidad positiva en el desarrollo del filamento y su aceptación por parte de los usuarios, generando a su vez un valor agregado a los residuos plásticos de las industrias.

B. Revisión de literatura

Posteriormente de haber realizado el análisis de las posibles causas de variación en las propiedades físicas del material, y de las oportunidades que favorecen en el desarrollo del filamento con material reciclado, se hizo una revisión del estado del arte, enfatizando en artículos de investigación los cuales abordan temáticas similares ya fueran desde la manufactura aditiva, o realizaran una caracterización de material reciclado y su degradación en las propiedades. La información se encuentra sintetizada en la TABLA VII, donde se tiene el título del documento, los autores, año de elaboración, el resumen el cual presenta la metodología utilizada por los autores, y por último el aporte al proyecto donde se encuentran los resultados obtenidos en dichos documentos. Además, con el fin de establecer otras posibles alternativas, se realizó una consulta a investigaciones las cuales hayan considerado la mezcla de polímeros, esta información se encuentra en el anexo 7.

TABLE VII.
RESUMEN REVISIÓN DE LITERATURA

| Título | Autor (es) | Año | Resumen General | Aporte al Proyecto |
|---|--|------|--|---|
| La impresión 3D se vuelve ecológica: Estudio de las propiedades de los polímeros reciclados post-consumo para la fabricación de componentes de ingeniería | Ana C. Pinho, Ana M. Amaro, Ana P. Piedade | 2020 | Se da una introducción a la problemática de los residuos plásticos generados en los diferentes sectores, y cómo mediante la impresión 3D, es posible reintegrar plásticos reciclados en la producción de filamentos para la generación de diferentes diseños, a partir de PLA y ABS. Se realiza una comparación de las diferentes propiedades mecánicas, térmicas y químicas de los materiales tanto de forma reciclada, como el polímero virgen. Resumiendo al final los datos obtenidos mediante los diferentes ensayos a los cuales fueron sometidos los materiales por medio de probetas elaboradas del polímero [22]. | El análisis de los espectros FTIR para las propiedades químicas de los grupos funcionales químicos de ambos polímeros mostró que para los materiales de PLA los espectros de los materiales vírgenes y reciclados son muy similares y presentan las vibraciones típicas del PLA, sin embargo, los resultados para el ABS mostraron que, para las vibraciones de los principales grupos químicos, se obtuvieron pequeñas variaciones [22]. Para la caracterización térmica de los materiales, mediante el análisis termogravimétrico, se obtuvo la temperatura donde inicia la degradación de los materiales, para el PLA reciclado fue de 265°C y para el ABS reciclado de 378°C, concluyendo que la estabilidad térmica de los materiales no se ve afectada por el proceso de reciclado. Los valores de la temperatura de transición vítrea fueron similares tanto para el material reciclado como el material virgen [22]. Por último, para las propiedades mecánicas de los materiales, se obtuvo que los materiales reciclados presentan un mayor esfuerzo a la tensión. Para el PLA reciclado el valor fue de 39,6 MPa y para el ABS reciclado fue de 30,9 MPa [22]. |
| Red de cadena de suministro de circuito cerrado para el reciclaje de plástico local y distribuido para la impresión 3D: un enfoque de optimización basado en MILP | Pavlo Santander, Fabio A. Cruz Sanchez, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo | 2020 | Realiza un estudio de la viabilidad económica y ambiental de fabricación a través de MA con materiales plásticos reciclados, para esto Establece componentes claves a tener en cuenta en el uso de materiales reciclados para impresión 3D. Este enfoque del reciclaje de plástico presenta algunas complejidades técnicas, sociales y económicas: Técnico: la gran variedad de termoplásticos con diferentes propiedades y su falta de especificidad en las categorías, La incertidumbre sobre la cantidad y composición de los residuos plásticos, la calidad del producto impreso (independientemente de si el plástico es virgen o reciclado), la disponibilidad y | Presenta un modelo matemático evaluando la viabilidad económica, ambiental y social de la fabricación de filamento 3D utilizando mezclas de material reciclado y virgen de PLA, los datos obtenidos de este modelo resultan favorables para un entorno de producción en Europa, pero con una definición de variables de tal manera que puede ser aplicable a otros entornos. El artículo también presenta aspectos favorables como la viabilidad técnica del reciclaje mecánico de PLA para impresoras 3D y una metodología general para evaluar la reciclabilidad de los polímeros utilizados como materia prima para la impresión 3D. Con lo anterior se puede establecer la existencia de casos donde se ha |

| Título | Autor (es) | Año | Resumen General | Aporte al Proyecto |
|---|---|-------------|--|--|
| | | | <p>eficiencia limitadas de las tecnologías de reciclaje a pequeña escala</p> <p>Social: percepción del valor de elementos reciclados, falta de aceptación y baja contribución a los procesos de reciclaje</p> <p>Económico: incertidumbre de los beneficios económicos y los costos asociados a producción y comercialización [23].</p> | <p>comprobado la viabilidad técnica, ambiental, social y económica, que favorecen los procesos de producción de filamentos a partir de residuos plásticos, como base para el desarrollo del proyecto. Los reportes de resultados indican que, con un aprovechamiento de 28,8 Kg de residuo de PLA mensuales, obtienen un beneficio económico de 317,8 € y un ahorro de 120 Kg en emisiones de CO₂ [23].</p> |
| <p>Fabricación y propiedades del compuesto de fibra r-PETG/PET - Novedad para reciclar los desechos de plástico de PETG en compuestos de ingeniería para moldeo por inyección</p> | <p>P. Franciszczaka , E. Piesowicz, K. Kalniņšb</p> | <p>2018</p> | <p>Se realiza un estudio del posible aprovechamiento del PETG mediante el uso de los residuos plásticos generados en diferentes tipos de envase, para ello se realiza una comparación de tres diferentes alternativas, donde la primera es un tipo del PETG el cual ha sido procesado del polímero puro, el segundo material es el polímero reciclado, añadiendo en su composición fibras de PET con fin de aumentar el peso molecular y así mejorar las características del material, y por último se hacen comparaciones con el material reciclado añadiendo un aditivo con el fin de mejorar sus propiedades.</p> <p>Del proceso experimental, se obtiene que la proporción de PETG reciclado con fibras de PET alcanza propiedades mecánicas similares al polímero elaborado con PETG de forma pura, sin embargo, los resultados obtenidos en comparación con el material que su compuesto era 100% reciclado, no favorecía a las diferentes propiedades [24].</p> | <p>La caracterización de las propiedades térmicas y mecánicas para dos materiales diferentes, siendo estos: el PETG reciclado con PET y el PETG con el aditivo para el polímero [24].</p> <p>En los ensayos para el índice de fluidez, se obtuvo que el material de PETG reciclado, el cual no presentaba una adición en el aditivo, presentaba un índice 2,5 veces mayor con respecto al del PETG puro, sin embargo, para el material que presentaba dicho aditivo, su índice de fluidez aumento 4 veces [24].</p> <p>Las propiedades mecánicas de los materiales, indicaron una disminución en el esfuerzo a tensión del PETG reciclado en aproximadamente un 10%, donde el material PETG virgen presentaba un valor de 44,9 MPa y el material reciclado con fibras de PET en una proporción 70% de material reciclado, fue de 35,1 MPa [24].</p> <p>Por último se tiene la resistencia al impacto de los materiales, donde el PETG con fibras de PET obtuvo un valor mayor con respecto a los otros materiales, siendo de 12,8 KJ/m² [24].</p> |
| <p>Filamentos sostenibles de Nylon-6 de alto rendimiento para manufactura aditiva</p> | <p>Ilenia Farina , Narinder Singh , Francesco Colangelo,Raimondo Luciano, Giulio Bonazzi, Fernando Fraternali</p> | <p>2019</p> | <p>Debido a la problemática ambiental de los plásticos de un solo uso, la investigación busca realizar una comparación entre el nylon reciclado, nylon el cual ha sido modificado su estructura mediante Óxido de aluminio y aluminio [25].</p> <p>Mediante diferentes ensayos, se obtienen resultados los cuales identifican beneficios en las propiedades mecánicas y térmicas del nylon el cual ha sido reforzado, en donde incluso dichas propiedades obtuvieron valores más altos en comparación con el nylon compuesto de material virgen. Debido a que la investigación busca darle viabilidad al polímero en la producción de filamentos para impresión 3D, se caracterizó mediante la generación de diferentes diseños [25].</p> | <p>Se realizaron los ensayos para el índice de fluidez con tres composiciones diferentes, donde la cantidad de Nylon reciclado sería constante, variando únicamente las cantidades de aluminio y de óxido de aluminio, estos valores se encontraban alrededor de 2,25 g/10min [25].</p> <p>Para las propiedades mecánicas del material con composición única de material reciclado, se obtuvo un valor de 9,02 MPa en el esfuerzo a la tensión y de 14% en la deformación a la rotura. Para el material el cual tenía una composición de Nylon reciclado, aluminio y óxido de aluminio se obtuvo un valor de 21,65 MPa en el esfuerzo a la tensión y de 12,74% en la deformación a la rotura [25].</p> |
| <p>Consideraciones dimensionales sobre las propiedades mecánicas de las piezas de polímero impresas en 3D. Datos ambientales y de ingeniería para respaldar</p> | <p>Michel Biron</p> | <p>2020</p> | <p>El documento presenta información sobre sostenibilidad en la producción y uso de plásticos e incluye requisitos medioambientales, capacidad de funcionamiento de piezas y productos y competitividad. La información es presentada en diferentes tablas según el</p> | <p>El principal aporte son los datos referentes al impacto medioambiental, presentados en tablas e indicadores de diferentes polímeros, incluidos los que son más comunes en la fabricación de filamentos para impresión 3D, la información</p> |

| Título | Autor (es) | Año | Resumen General | Aporte al Proyecto |
|----------------------------------|------------|-----|---|---|
| el diseño ecológico de plásticos | | | indicador a evaluar con una variedad considerable de polímeros, entre ellos PLA, ABS, TPU, PET, PC y Nylon, los cuales son relevantes para el proyecto. Entre los indicadores de interés están: contenido renovable esperado, energía total incorporada, huella de carbono neta, huella hídrica esperada, temperatura de transición vítrea, densidad, ejemplos de rendimiento y resistencia a la tracción, alargamiento a la rotura o deformación máxima y módulo de tracción [26]. | presentada por los diferentes indicadores influye en la elección de la alternativa. El documento permite identificar que la producción de nylon genera el mayor impacto ambiental negativo de los polímeros en consideración para el proyecto, con huella de carbono e hídrica de 7,7 Kg CO ₂ y 265 m ³ H ₂ O respectivamente para un kilogramo de plástico, en cambio la producción de PLA es la que menor impacto ambiental tiene con una huella de carbono e hídrica de 1,4 Kg CO ₂ y 200 m ³ H ₂ O respectivamente para un kilogramo de plástico [26]. |

C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Con la información presente en el trabajo se realizó una selección de diferentes alternativas a través del método creativo Disney, el cual agrupa en filtros las diferentes propuestas realizadas con los datos recolectados en las anteriores etapas para determinar cuáles de estas propuestas se ajustan más a los objetivos del proyecto. El método Disney realiza un filtro a través de tres etapas, las cuales son: Soñador, realista y crítico, que permiten analizar las alternativas al pasar por los diferentes componentes de la metodología, disminuyendo así el número de opciones con el objetivo de considerar las mejores propuestas. La Fig.14 es una representación gráfica del método Disney y las propuestas en cada etapa que hacen referencia al material a usar en el diseño del filamento.

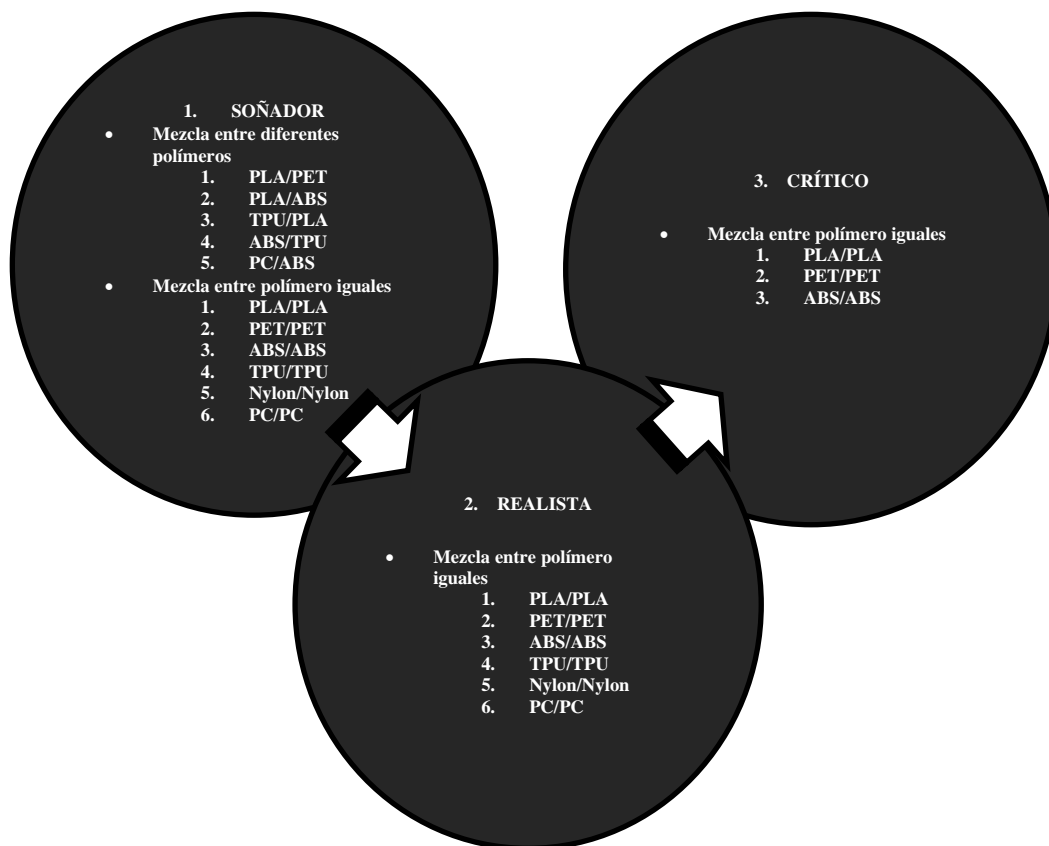


Fig. 14. Método Disney para el análisis de alternativas.

En la etapa soñador se registraron las alternativas que surgieron de la investigación y se ajustan al proyecto, considerando los materiales más comunes en la impresión 3D. Las propuestas se dividen en: Usar mezclas entre diferentes polímeros que se encontraron en la literatura (cabe aclarar que no son mezclas con plásticos reciclados) y mezclas entre polímeros iguales.

Después de establecer las posibles alternativas en la etapa de soñador, siguiendo la metodología se pasó a la etapa realista donde se analizan que propuestas son más susceptibles de llevarse a cabo y se cumplan de manera satisfactoria. Teniendo en cuenta lo anterior se tomó la decisión de seleccionar solo las alternativas referentes a mezclas entre polímeros del mismo tipo, debido a que la mezcla entre diferentes polímeros es más compleja, difícil de llevar a cabo y además no se cuenta con información suficiente que garantice el funcionamiento de la mezcla entre diferentes polímeros para la elaboración de filamentos.

Por último, está la etapa crítica en la cual se evalúan los posibles beneficios e inconvenientes que pueden presentar las propuestas planteadas en la etapa realista. Las alternativas descartadas son: TPU, nylon y PC; principalmente no se toman en consideración debido a que son los que presentan menor demanda y altos precios en el mercado, además se tiene en cuenta las particularidades de cada material, como el TPU que es un material que necesita conocimientos avanzados en impresión 3D para su aplicación; el nylon es un material muy inflamable y propenso a fallas en los procesos de extrusión [27]; por último, está el policarbonato (PC), este material puede liberar sustancias nocivas para la salud, es susceptible a la humedad, rayos UV e hidrólisis, por lo cual no es adecuado para el uso en exteriores y puede causar problemas en la extrusión [28].

Al finalizar la aplicación del método Disney se llegó a la conclusión de que al no ser un mercado de consumo masivo las mejores alternativas son el uso de los materiales: PLA/PLAR, ABS/ABSR y PET/PETR, debido a que estos materiales son los más demandados por los usuarios de impresión 3D, no requieren conocimientos avanzados para su uso, son de bajo costo en comparación con otros materiales y diversas aplicaciones, lo anterior resulta favorable al ser de interés y accesible tanto para usuarios nuevos como experimentados.

Una vez definidas las alternativas de material para el diseño del filamento, se utilizó una metodología AHP para analizar y jerarquizar las propuestas, permitiendo decidir cuál de las alternativas es la más adecuada mediante criterios establecidos por el equipo de proyecto que se muestran a continuación:

- **Preferencia del usuario:** El criterio tiene en cuenta la demanda del filamento compuesto por un material específico. Para esto se realizaron entrevistas por medio de un cuestionario virtual a usuarios de impresión 3D (ver anexo 5), con lo anterior se determinó que el 92,00% de usuarios prefiere PLA; después está el PET con preferencia de 44,00% y ABS con preferencia 36,00%. Este criterio es considerado el de mayor relevancia por el equipo de proyecto debido que define el material para el diseño del filamento que tendría mayor aceptación en el mercado.
- **Precio de venta:** Este criterio pretende medir cual es el filamento, según el material, más asequible del mercado. Los diferentes rangos de precios se obtuvieron de distribuidores de filamentos en Colombia (ver anexo 8) y se determinó el precio de venta promedio para cada filamento según el material, con esto se pretende establecer un producto atractivo para nuevos usuarios de impresión 3D y como posible estrategia de penetración en el mercado. Este criterio tiene como resultado que los filamentos de PLA son los de precio más bajo con un promedio de \$94.932,20/kg, siguiendo los filamentos de ABS con promedio de \$95.814,22/kg y por último los filamentos de PET con promedio de \$98.033,33/kg. Aunque los promedios de precios son cercanos, los precios mínimos en el mercado confirman lo planteado anteriormente, siendo el filamento de PLA el más económico entre los polímeros más comunes en impresión 3D.
- **Impacto ambiental:** Este criterio busca definir qué material tiene mayor impacto ambiental e identificar que plástico genera mayor beneficio en cuanto a la reutilización de los residuos. El impacto ambiental se mide a través de indicadores como la huella de carbono, la huella hídrica y consumo energético; los datos hacen referencia a la huella ambiental producida por la fabricación de plásticos los cuales se obtuvieron de la literatura con la finalidad de establecer referencias para la toma de decisiones. En la TABLA VIII se registraron los valores de los indicadores para cada plástico de las alternativas.

TABLA VIII.
INDICADORES AMBIENTALES [26]

| Indicadores | Contenido energético | Huella de carbono | Huella hídrica |
|-----------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Unidades Plásticos | MJ/Kg plástico | KgCO ₂ /Kg plástico | M ³ /Kg plástico |
| PLA | 47 | 1,4 | 200 |
| ABS | 97 | 3,9 | 263 |
| PET | 78 | 3 | 30 |

Con los datos presentes en la TABLA VIII se concluye que el ABS es el plástico con mayor impacto ambiental, con los valores más altos en cada indicador; después está el PET y por último el PLA. Cabe resaltar que la huella hídrica tiene en cuenta las cantidades de agua necesaria para la producción de los plásticos, pero se desconoce las condiciones del agua al final del proceso.

En cuanto al reciclaje de materiales se consideró un sistema general que define el proceso para cada plástico graficado en la Fig.15, la diferencia en el proceso está en la complejidad de cada paso dependiendo de los requerimientos para cada material.



Fig. 15. Proceso de reciclado de plásticos.

- Costo de recuperación: Este criterio hace referencia a los costos asociados a la obtención de material reciclado y preparación antes de añadir a la mezcla con el material virgen, para esto se tiene en cuenta los procesos implicados para la recuperación de cada material:
 - Se definió que el material con menos costos en este criterio es el PLA debido a que la fuente de obtención del material no expone el plástico a humedad ni contaminantes, cómo serían los residuos de la producción de filamento, piezas sin utilidad y las piezas fallidas; la limpieza no es rigurosa y los procesos de reciclaje no son complejos.
 - En segundo lugar, está el PET que es encontrado en artículos cotidianos como botellas y envases, aumenta los costos en comparación con el PLA debido a los procesos de selección y limpieza que son más complejos por su exposición a contaminantes y humedad.
 - En último lugar está el ABS que está presente en electrodomésticos y partes de automóviles, debido a que es un material que no se encuentra separado de otros materiales y en ocasiones contiene aditivos que pueden ser nocivos para la salud, requiere procesos de selección y limpieza más rigurosos que los anteriores plásticos.
- Facilidad de obtención: La cantidad de residuos disponibles y la manera en que se puede obtenerlos son una parte relevante para determinar que alternativa es la mejor, de este modo se definió este criterio como uno de los más importantes. Los residuos plásticos que presentan mayor volumen son los de PET que se puede encontrar en productos de consumo diario y se pueden conseguir en puntos de recolección; por otra parte, el PLA Y ABS no son tan comunes de encontrar; además, el ABS requiere de una selección más rigurosa.
- Facilidad de reciclaje: Se tiene en cuenta el número de procesos y la complejidad de estos para obtener un material reciclado útil para la mezcla con el material virgen. El material más fácil de reciclar es el PLA debido a que no es común que se encuentre expuesto a humedad o contaminantes y no requiere procesos de reciclado complejos. Después está el PET, por su exposición a elementos contaminantes y humedad requiere procesos de limpieza y selección más detallada. Por último, está el ABS a causa de la presencia de posibles sustancias nocivas para la salud, la separación de otros materiales y procesos más complejos de procesamiento de residuos.

Una vez identificados y definidos los criterios se continúa con la metodología AHP asignando una estimación del nivel de importancia para cada criterio, calculando un vector prioridad de acuerdo a la asignación de valor realizada por el equipo de proyecto y posteriormente comprobando si el índice de consistencia (CR) es menor a 10% garantizando que las asignaciones de valor son consistentes (ver anexo 9). En la TABLA IX se puede observar los resultados de vector prioridad y consistencia.

TABLA IX.
PRIORIDAD Y CONSISTENCIA DE CRITERIOS DE LA METODOLOGIA AHP

| Criterios | Vector Prioridad |
|--------------------------|------------------|
| Costo de recuperación | 9,83% |
| Preferencia del usuario | 28,71% |
| Precio de venta | 16,98% |
| Impacto ambiental | 5,95% |
| Facilidad de obtención | 28,71% |
| Facilidad de reciclaje | 9,83% |
| Razón de Consistencia CR | 0,63% |
| ¿Es consistente? | SI |

Después de definir la prioridad de los criterios y verificar la consistencia, se realizó el mismo proceso con las alternativas teniendo en cuenta cada criterio (ver anexo 9) con la finalidad de determinar que alternativa tiene mayor porcentaje de prioridad que será seleccionada para el desarrollo del proyecto. En la TABLA X se registran los resultados de la metodología AHP, los cuales evidencian que la alternativa con mayor prioridad con un porcentaje de 50% es la mezcla de material virgen y reciclado de PLA, la cual se utilizara para el diseño del filamento.

TABLA X.
PRIORIDAD DE ALTERNATIVAS

| ALTERNATIVAS | Total | Mejor plástico |
|--------------|-------|---|
| PLA/PLA | 50% | El mejor plástico después de realizar la matriz de jerarquía, fue el PLA. |
| PET/PET | 31% | |
| ABS/ABS | 19% | |

D. Objetivos

OBJETIVO GENERAL:

Diseñar un sistema productivo para la obtención de un material a partir de la mezcla de PLA reciclado y virgen, susceptible de ser usado en la fabricación de filamentos para impresión 3D.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Caracterizar las propiedades mecánicas del filamento de PLA virgen y reciclado.
- Definir proporciones de PLA reciclado a partir de la evaluación mecánica de diferentes mezclas con polímero virgen.
- Caracterizar las propiedades físico-térmicas de la mezcla seleccionada.
- Diseño del proceso de fabricación de un filamento susceptible de ser usado para impresión 3D, con el material seleccionado.
- Evaluar la viabilidad financiera del proceso de producción del filamento.

E. Plan de trabajo (PdT)

Una vez definido el objetivo general y los objetivos específicos, se procede a realizar un plan de trabajo, con el fin de establecer las diferentes actividades que se desarrollarán y presentarán en Proyecto de Diseño II. En la TABLA XI se expone las respectivas actividades que se realizarán mediante las cuales se cumplirá cada uno de los objetivos específicos establecidos, en el anexo 10 se encuentra el plan de trabajo elaborado en Project®.

TABLA XI.
PLAN DE TRABAJO

| Objetivo General | | | | | |
|---|--|-----------------------------------|------------------------------|---|------------|
| Diseñar un sistema productivo para la obtención de un material a partir de la mezcla de PLA reciclado y virgen, susceptible de ser usado en la fabricación de filamentos para impresión 3D. | | | | | |
| Objetivo específico | Actividades | Área IISE | Herramienta | Entregable | Fecha |
| 1. Caracterizar las propiedades mecánicas del filamento de PLA virgen y reciclado. | 1.1. Definición de la fuente y adecuación del material reciclado. | 12.1.Product Design & Development | Pasos del proceso de diseño. | Material reciclado adecuado para la conformación de probetas. | 03/02/2021 |
| | 1.2. Elaboración de las probetas de ensayo a partir del polímero virgen y reciclado. | | | Registro de probetas de ensayo. | 11/02/2021 |
| | 1.3. Realizar ensayos mecánicos a tensión del material virgen y reciclado. | | Proyecto de diseño. | Propiedades mecánicas a tensión (Resistencia, módulo de elasticidad y deformación en el punto de ruptura) | 23/02/2021 |
| | 1.4. Interpretar los datos obtenidos. | | | Análisis de la información obtenida. | 25/02/2021 |
| 2. Definir proporciones de PLA reciclado a partir de la evaluación mecánica de diferentes mezclas con polímero virgen. | 2.1. Establecer teóricamente las diferentes proporciones de mezcla que se evaluarán. | 12.1.Product Design & Development | Proceso de diseño. | Matriz con las proporciones de material reciclado y virgen establecidas para realizar los ensayos experimentales. | 01/03/2021 |
| | 2.2. Realizar las mezclas de polímero reciclado y virgen con las proporciones definida teóricamente. | | | Pellets de mezclas de polímero reciclado y virgen con las proporciones establecidas. | 05/03/2021 |
| | 2.3. Elaboración de las probetas de ensayo a partir de las mezclas. | | | Reporte de los resultados. | 16/03/2021 |

| Objetivo General | | | | | |
|---|--|-----------------------------------|---------------------|--|------------|
| Diseñar un sistema productivo para la obtención de un material a partir de la mezcla de PLA reciclado y virgen, susceptible de ser usado en la fabricación de filamentos para impresión 3D. | | | | | |
| Objetivo específico | Actividades | Área IISE | Herramienta | Entregable | Fecha |
| | 2.4. Realizar ensayos mecánicos a tensión del material virgen y reciclado. | 12.1.Product Design & Development | Pruebas de diseño. | Propiedades mecánicas a tensión (Resistencia, módulo de elasticidad y deformación en el punto de ruptura). | 19/03/2021 |
| | 2.5. Interpretar los datos obtenidos y selección de mezcla para la fabricación de filamento para impresión 3D. | | Proceso de diseño. | Análisis de la información obtenida y proporción de mezcla material virgen/reciclado. | 05/04/2021 |
| 3. Caracterizar las propiedades físico-térmicas de la mezcla seleccionada. | 3.1. Evaluar las transiciones térmicas del material. | 12.1.Product Design & Development | Proceso de diseño. | Propiedades térmicas del material. | 14/04/2021 |
| | 3.2. Estimar la densidad del material. | | | Densidad del material. | 19/04/2021 |
| | 3.3. Interpretar los datos obtenidos. | | | Informe recopilando la información obtenida y su respectivo análisis. | 23/04/2021 |
| 4. Diseño del proceso de fabricación de un filamento susceptible de ser usado para impresión 3D, con el material seleccionado. | 4.1. Pruebas de viabilidad de obtención de filamento. | 12.1.Product Design & Development | Proyecto de diseño. | Información de resultados obtenidos en producción del filamento | 06/05/2021 |
| | 4.2. Definir el proceso para la elaboración de filamentos para impresión 3D. | | | Diagrama de flujo del proceso de producción. | 29/04/2021 |

| Objetivo General | | | | | |
|---|---|---|--|---|------------|
| Diseñar un sistema productivo para la obtención de un material a partir de la mezcla de PLA reciclado y virgen, susceptible de ser usado en la fabricación de filamentos para impresión 3D. | | | | | |
| Objetivo específico | Actividades | Área IISE | Herramienta | Entregable | Fecha |
| | 4.3. Definir los requisitos del proceso final: mano de obra, materia prima y maquinarias. | 4. Facilities Engineering & Energy Management | Manejo de materiales. | Requerimientos de los recursos necesarios para la producción del filamento. | 04/05/2021 |
| | 4.4. Planear una distribución de planta. | 4. Facilities Engineering and Energy Management | Ingeniería de plantas e instalaciones. | Plano de distribución de planta. | 11/05/2021 |
| 5. Evaluar la viabilidad financiera del proceso de producción del filamento. | 5.1. Estudiar la demanda del producto. | 7. Operations Engineering & Management | Estudio de la demanda. | Proyecciones de venta. | 21/05/2021 |
| | 5.2. Evaluar financieramente el proyecto. | 3. Engineering Economic Analysis | Clasificación de costos, estados financieros y Simulación. | Criterios de evaluación de proyectos. Análisis de riesgos. | 27/05/2021 |

V.DISEÑAR

A. Desarrollo del diseño de la solución

Para poder realizar el diseño del sistema de producción de materia prima para impresión 3D se estableció en primera instancia las proporciones de PLA virgen y reciclado a usar, para esto fue necesario realizar una comparación de las propiedades físico-térmicas y mecánicas del material virgen, reciclado y las mezclas establecidas mediante revisión bibliográfica y que se definen en la TABLA XII. TABLA XII. El proceso de comparación de los materiales mencionados se hizo mediante la estimación de las propiedades, por medio de pruebas de laboratorio, para lo cual fue necesario fabricar probetas estandarizadas bajo las normas ASTM D638 [29], D790 [30] y D792 [31] (propiedades mecánicas a tensión, flexión y densidad, respectivamente).

TABLA XII.
NOMENCLATURA DE LOS DIFERENTES MATERIALES ESTUDIADOS.

| Material | Nomenclatura |
|--|--------------|
| PLA virgen | 100/0 |
| Mezcla de PLA con 90 % virgen y 10 % reciclado | 90/10 |
| Mezcla de PLA con 80% virgen y 20 % reciclado | 80/20 |
| Mezcla de PLA con 70 % virgen y 30 % reciclado | 70/30 |
| PLA reciclado | 0/100 |

El PLA virgen, fue un PLA 2003D de Nature Work, este cuenta con las propiedades mostradas en la TABLA XIII; mientras que el PLA reciclado se obtuvo mediante un proceso de recolección de residuos de PLA provenientes de desperdicios del proceso de impresión 3D, para esto se contactaron empresas, tales como el Laboratorio de Metrología de la Universidad Santiago de Cali, el Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, la empresa Iproyect e IP3D. Una vez obtenido el material de PLA reciclado se realizó un proceso de inspección con el fin de descartar otros materiales plásticos no deseados o piezas, las cuales pudieran estar impregnadas de alguna sustancia u otro material, con el propósito de evitar

contaminación del material; a su vez, durante este proceso, se realizó una separación por colores para disminuir la heterogeneidad del material reciclado, debido a la presencia de diferentes aditivos, entre un material y otro.

*TABLA XIII.
PROPIEDADES PLA 2003D DE NATURE WORK*

| | |
|--|--------------|
| Propiedades físicas | Ingeo 2003D |
| Densidad relativa (g/cm ³) | 1,24 |
| MFR, g/10 min (210°C, 2,16 Kg) | 6 |
| Claridad | transparente |
| Propiedades mecánicas | |
| Resistencia a la tensión (Mpa) | 53 |
| Resistencia a la tracción (Mpa) | 60 |
| Módulo de tensión (Gpa) | 3,5 |
| Tensión a la elongación, % | 6 |
| Temperatura de deflexión térmica (°C) | 55 |
| Temperatura de fusión (°C) | 210 |

Una vez recuperada la cantidad de material reciclado necesario para este estudio se procede a ser triturado, obteniendo así un tamaño granular de aproximadamente 5 mm en su dimensión mayor, como se muestra en la Fig. 16-b, lo que facilita el post-proceso de extrusión del material. Este proceso de triturado se realizó en el Centro ASTIN-SENA, mediante un molino de golpe (ver Fig. 16-a).



Fig. 16. a) Molino de golpe (Ubicado en el Centro ASTIN-SENA), b) PLA reciclado posteriormente de ser triturado.

Teniendo el material reciclado molido, se mezclaron colores claros como, amarillo y blanco, esto con el propósito de evitar aditivos de coloración con los que cuentan los materiales oscuros, que podrían aumentar la variabilidad de las propiedades del material PLA reciclado (0/100) y las diferentes mezclas (90/10, 80/20, 70/30). Para una buena praxis de los laboratorios en la obtención de las propiedades físico-térmicas y mecánicas, era necesario que el material se encontrara homogenizado en su totalidad, por lo cual se realizaron dos ciclos de extrusión en una extrusora monotornillo adecuada por el equipo del proyecto en colaboración con el CAP de la universidad Javeriana (ver Fig. 17-a). A partir de la literatura y de experimentación piloto en la extrusora monotornillo, se definió la temperatura de extrusión del PLA, evitando que los materiales sufran una degradación térmica. Los valores determinados fueron de $160^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en el inicio de la extrusora y de $175^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ al final del

tambor de extrusión [24] y una rotación del tornillo a 110 rpm. Una vez procesado el material reciclado, se sometió a un nuevo proceso de molienda (ver Fig. 17-b).

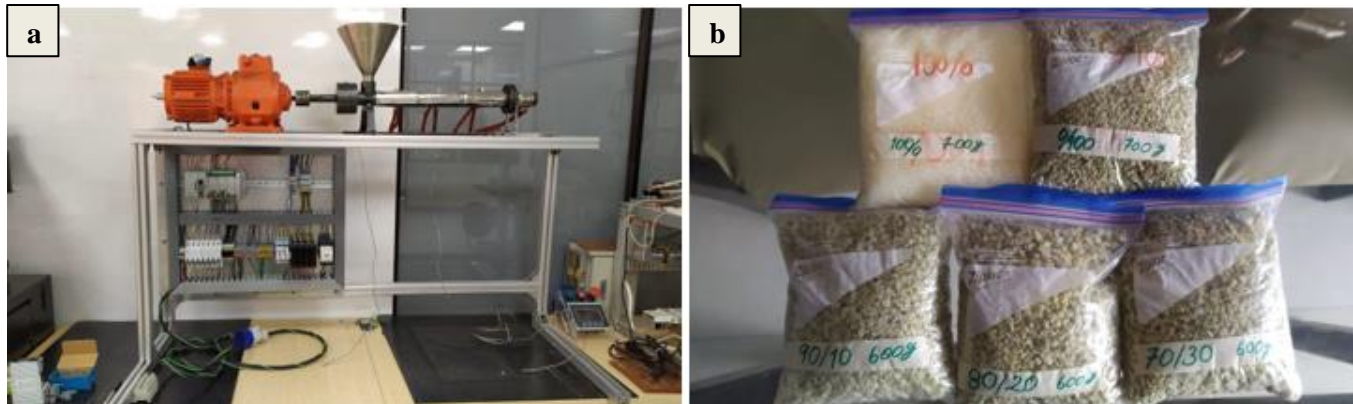


Fig. 17. a) Proceso de obtención de mezcla, b) materiales de estudio extruidos y molidos.

Como se mencionó anteriormente, se procesaron tres mezclas de PLA virgen y PLA reciclado, con porcentajes de 10%, 20% y 30% de material reciclado. Además, se evaluaron las propiedades físico, térmicas y mecánicas del material 100% virgen y 100% reciclado (ver Fig.18), como referentes para definir los efectos de las proporciones de material reciclado en las mezclas. Estas proporciones fueron establecidas, teniendo en cuenta los resultados obtenidos por Wellerson Diniz, *et al.*, en el año 2020 [31], donde encontraron que “la mezcla con 75% PLA virgen y 25 % PLA reciclado, mostro un rendimiento comparable al PLA puro, la reutilización de PLA de filamentos 3D post-consumo es factible para el desarrollo de materiales con buenas propiedades”.



Fig. 18. Placas obtenidas de PLA/PLA-R.

Por último, una vez obtenidas las mezclas a evaluar, se realizaron placas por moldeo por compresión, en una prensa de platos calientes LabPro400 de FONTIJNE PRESSES, ubicada en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Occidente. El proceso de moldeo se realizó bajo los parámetros mostrados en la Fig. 19 donde se llevó la prensa a una temperatura de 190°C manteniéndose por cinco minutos sin generar presión, posteriormente se le aplicó una presión de 190 KPa durante cinco minutos nuevamente y finalizando con el enfriamiento del material. Las placas obtenidas tuvieron dimensiones de 136 mm \pm 1 mm x 136 mm \pm 1 mm y espesor de aproximadamente 1.8 mm. Las probetas de ensayos de tensión, flexión y densidad, se obtuvieron a partir de las placas mediante corte laser, en una cortadora laser CO Metal 13090, ubicada en el CAP de la universidad Javeriana. La distribución de las probetas con respecto a las dimensiones de las placas se puede observar en la Fig. 20.

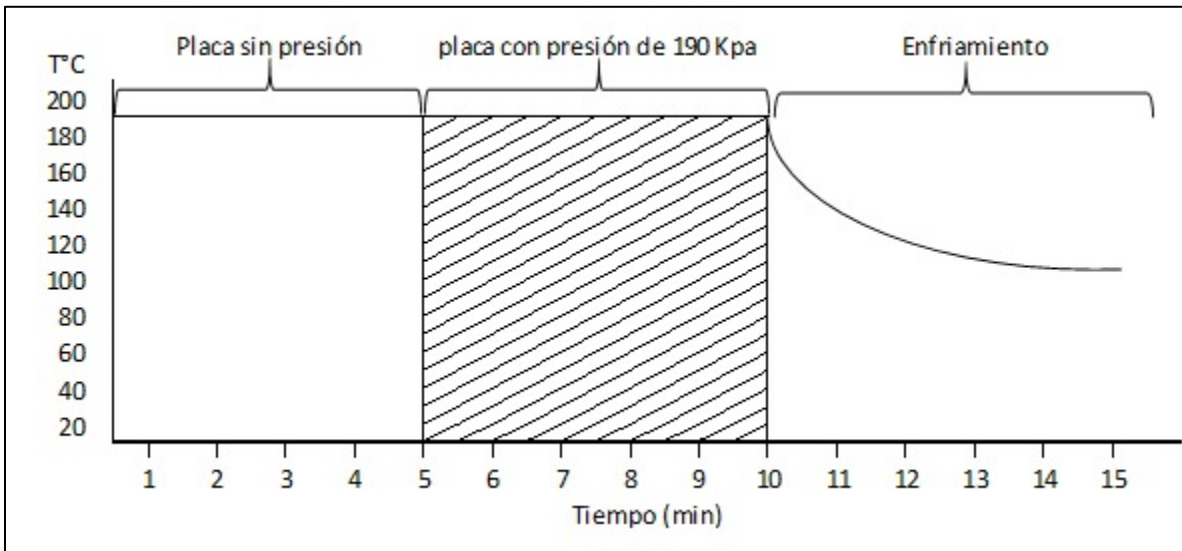


Fig. 19. Diagrama de proceso para moldeo de placas.

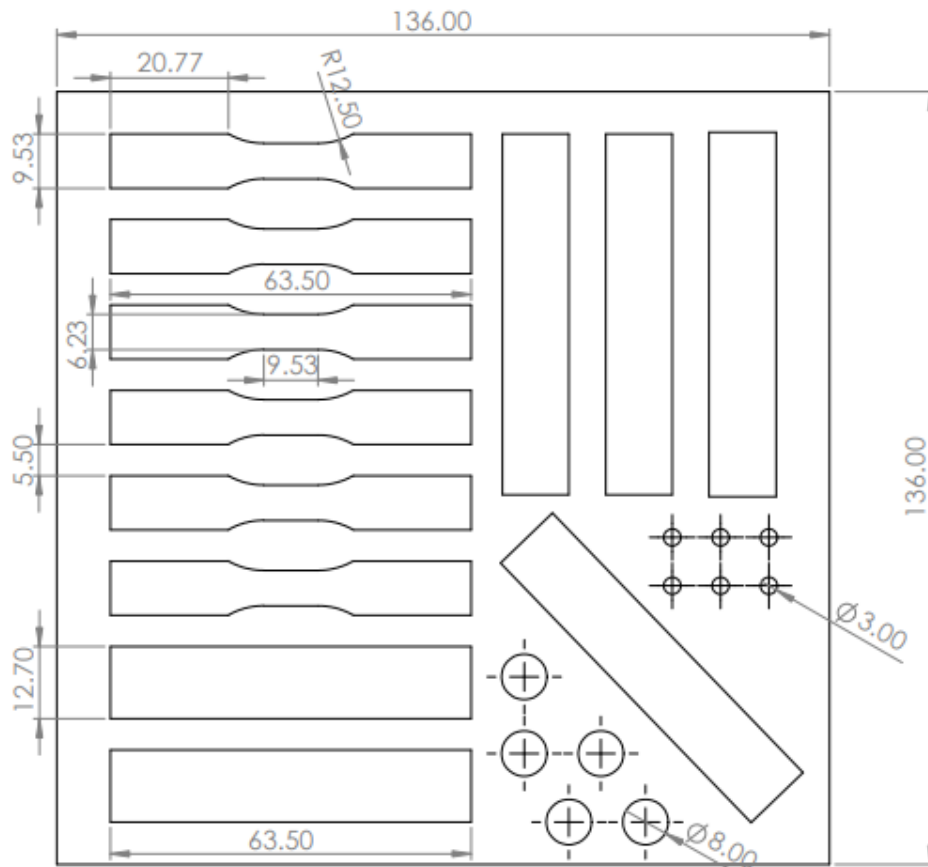


Fig. 20. Distribución de probetas por placa.

Con el fin de determinar las propiedades físico-mecánicas de las muestras, se realizaron ensayos de tensión con probetas de tipo V y velocidad de ensayo de 1 mm/min, según la norma ASTM D638 [29] y ensayos de flexión con probetas de 12,7mm de ancho, 63,5 mm de largo y 1.8 mm de espesor, aproximadamente. La velocidad de ensayo fue 0.85-mm/min y un límite de deformación de 5% según la norma ASTM D790 [30]. Para realizar los anteriores ensayos se usó una Máquina universal para ensayos mecánicos INSTRON 3366 (ver Fig. 21) y el Software Bluehill 2. Por último, se realizó ensayos de densidad con el método tipo A, según la norma ASTM D792[31].

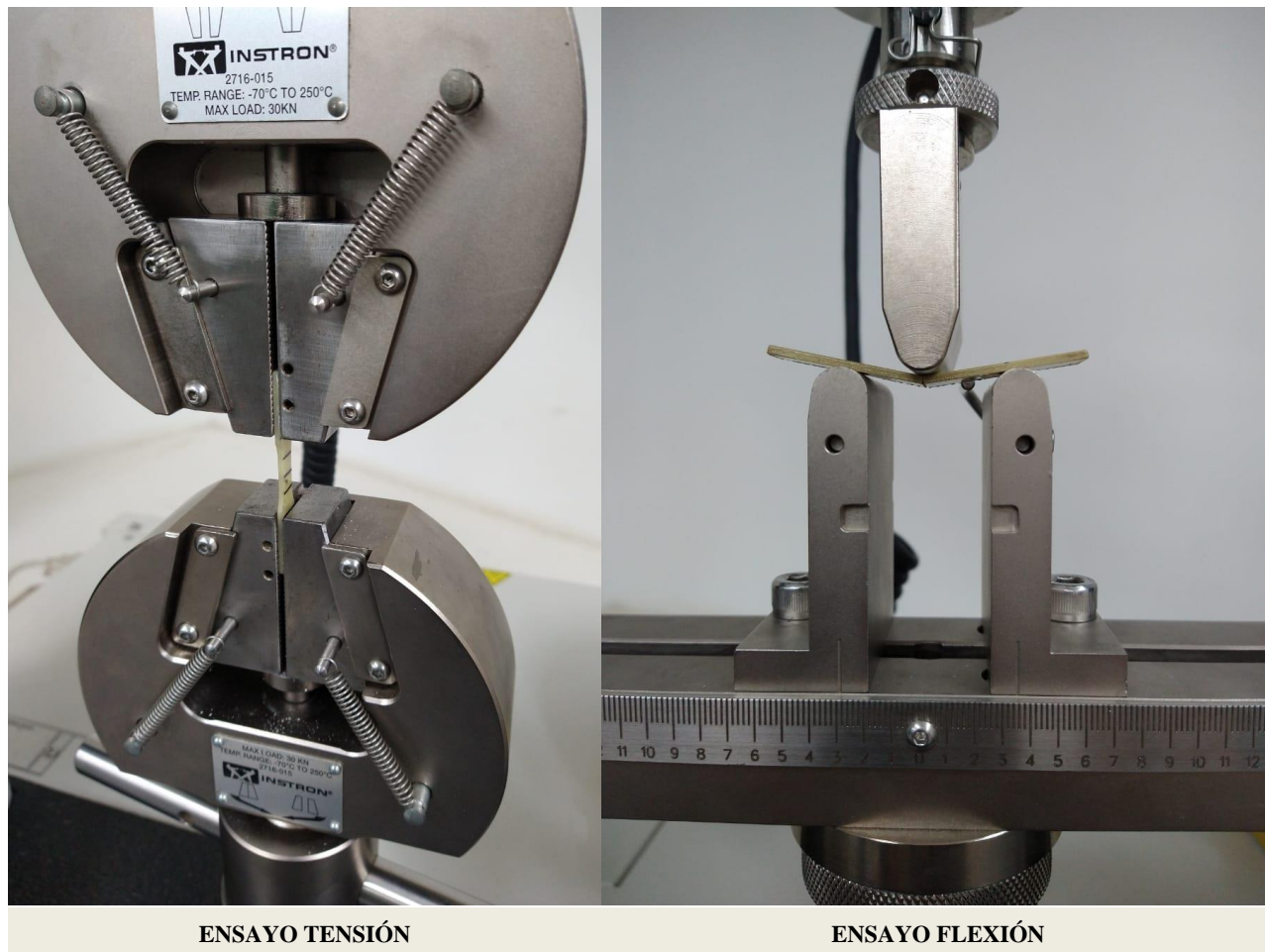


Fig. 21. Máquina universal para ensayos mecánicos INSTRON 3366

Después de la obtención de resultados, se realizó el análisis de datos, empezando con los ensayos de tensión de las muestras, como se puede observar en la gráfica de deformación en la carga máxima (ver Fig. 22), se incrementa el porcentaje de deformación a medida que aumenta la proporción de material virgen, a excepción de la muestra de 90/10, esto puede atribuirse a la homogeneidad de la mezcla, la baja proporción de material reciclado pudo provocar que en ciertas zonas de la probeta se pierda uniformidad, resultando en un material más rígido, lo anterior también se ve reflejado en la gráfica de módulo de elasticidad (ver Fig. 22), donde se puede observar que la muestra de 90/10 posee el mayor módulo de elasticidad en comparación a las demás muestras, evidenciando que es la muestra con mayor rigidez. En cuanto al esfuerzo máximo de tensión, se tiene que a medida que aumenta la proporción de material virgen, aumenta la resistencia del material, como se observa en la gráfica de esfuerzo máximo (ver Fig. 222), cabe resaltar que la diferencia de esfuerzo máximo no es significativa entre las muestras de 90/10 y 100/0 tomando valores de 51,19 y 52,44 MPa respectivamente.

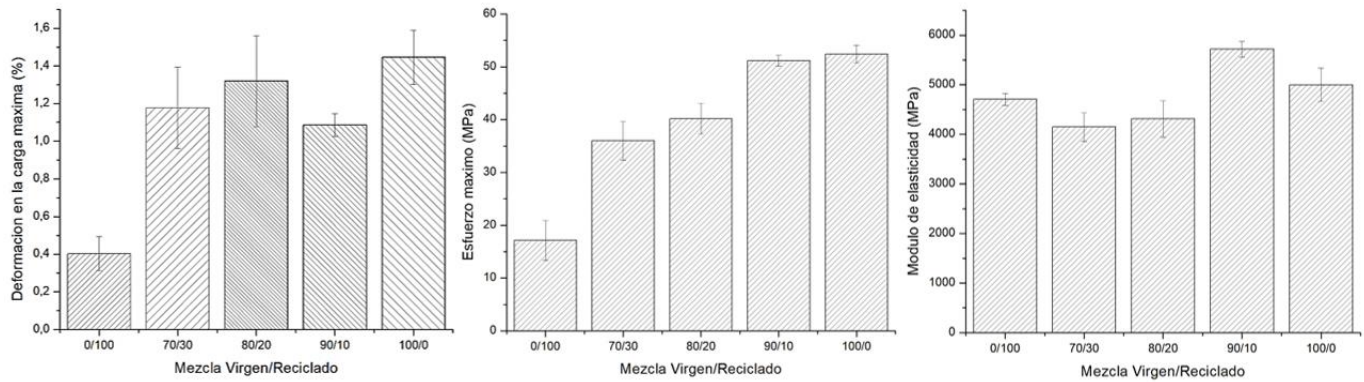


Fig. 22. Gráficas ensayo de tensión por muestra

Al analizar los datos obtenidos de los ensayos de flexión, se pudo observar que el comportamiento en las propiedades de las mezclas sigue un patrón esperado, en vista de que las propiedades físico-mecánicas se degradan a medida que aumenta la proporción de material reciclado en la mezcla. En cuanto al porcentaje de deformación se puede observar que a medida que disminuye la proporción de material reciclado la deformación aumenta, como se muestra en la gráfica de deformación en la carga máxima (ver Fig. 23), la mezcla de 80/20 presenta una menor deformación que la esperada, esto puede atribuirse a la homogeneidad de la mezcla como se mencionó anteriormente. Además, el esfuerzo máximo (ver Fig. 23), parece no mostrar diferencias significativas entre las muestras de 90/10 y 100/0, con valores de 78,95 y 79,729 MPa respectivamente; y al comparar los módulos de elasticidad (ver Fig. 23) se observa que la muestra de 90/10 posee el mayor módulo de elasticidad, siendo este el más rígido; coincidiendo con lo evidenciado por la evaluación de los materiales a tensión. Por su parte, las muestras de 70/30 y 80/20 presentan un módulo similar a la muestra de 100/0. En términos generales las muestras de 0/100 poseen la mayor degradación de sus propiedades como se muestra en la Fig. 23.

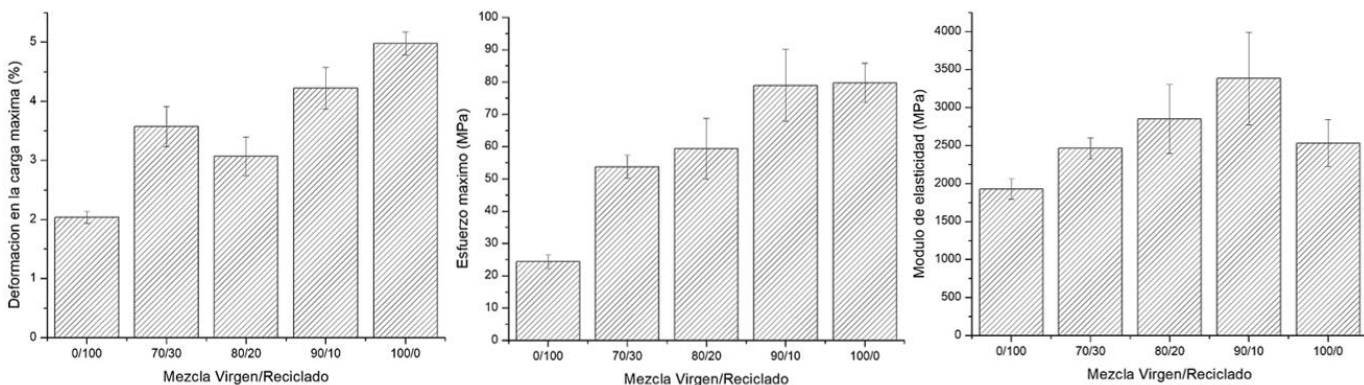


Fig. 23. Gráficas ensayo de flexión por muestra

Por último, en los ensayos de densidad los datos entre muestras tienen baja variabilidad, como se puede observar en la gráfica mostrada en la Fig. 24. El valor de densidad para la muestra de 0/100 es de 1,22 g/cm³, para las mezclas 70/30, 80/20 y 90/10 la densidad se encuentra alrededor de 1,25 g/cm³ y la densidad de la muestra 100/0 es de 1,26 g/cm³. De lo anterior, es posible identificar, una disminución en la densidad en las muestras con material reciclado, lo cual podría ser atribuido a que los polímeros reciclados, suelen tener un menor porcentaje de cristalinidad (con respecto al material virgen), lo que afecta el empaquetamiento de las cadenas poliméricas, reflejándose en una disminución de la densidad del material.

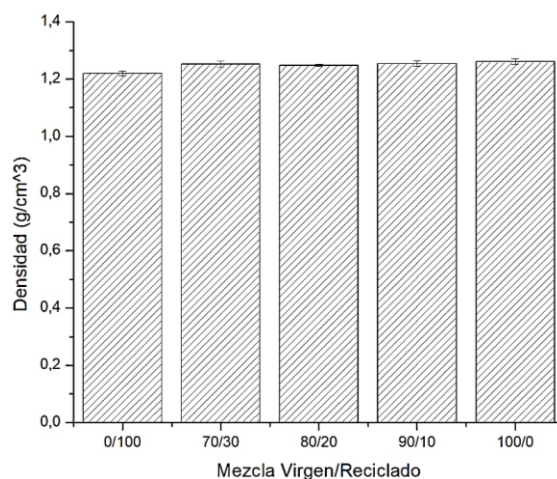


Fig. 24. Grafica de densidad por muestras

Con el propósito de seleccionar la mezcla PLA-virgen/PLA-reciclado a usarse en el estudio para la fabricación de filamentos de impresión 3D, se estableció que las propiedades más relevantes son la resistencia (esfuerzo máximo) y la rigidez obtenidas en el ensayo de tensión, en este sentido, la mezcla 80/20 presenta una disminución en la resistencia (esfuerzo máximo) del 23,38 % y en la deformación en la carga máxima del 8,76%, mientras que la mezcla 90/10 presenta disminuciones del 2,38% y del 24,87%, en la resistencia y la deformación en la carga máxima, respectivamente; los porcentajes mencionados se calcularon tomando como referencia el PLA 100% virgen. De acuerdo a lo anterior, se determinó que el material seleccionado para continuar con el estudio fue del diseño del filamento es de 90% virgen y 10% reciclado. En el anexo XX se encuentra a detalle las propiedades físico-mecánicas de las diferentes mezclas.

Para determinar las propiedades térmicas de los materiales se realizó pruebas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) a muestras con material 100% reciclado y 100% virgen en el centro ASTIN-SENA (ver anexo 12). Aquí es posible observar la aparición del pico de temperatura de transición vítrea para los dos materiales, 60,42°C para 100/0 y 56,32°C para 0/100. Por otra parte, el pico de fusión solo fue posible evidenciarlo en la muestra 0/100, esto es debido a que, durante el proceso de fabricación de pellets de material virgen, el proceso de enfriamiento es considerablemente rápido, lo que impide a formación de fases cristalinas en el polímero; es bien conocido que el pico de fusión muestra la energía requerida para fundir la fase cristalina del material. Teniendo en cuenta que el propósito de este ensayo es determinar mediante ley de mezclas (ver anexo 12), un aproximado de la temperatura de fusión del material 90/10, se tomó el valor del pico de fusión del material 0/100 (155,31 °C) y el valor reportado por la empresa productora del PLA virgen, 210 °C, mostrado en la TABLA XIII para realizar dicho calculo. Después de determinar las propiedades del material seleccionado se las resumió en una ficha técnica presente en la TABLA XIV.

TABLA XIV.
FICHA TECNICA PLA/PLA-R

| Propiedades del material | PLA/PLA-R |
|---|-----------|
| Proporción de PLA virgen [%] | 90 |
| Proporción de PLA reciclado [%] | 10 |
| Propiedades mecánicas | |
| Esfuerzo máximo a tensión [Mpa] | 51,193 |
| Deformación en carga max. a tensión [%] | 1,086 |
| Módulo de elasticidad a tensión [Mpa] | 5723,017 |
| Esfuerzo máximo a flexión [Mpa] | 78,958 |
| Deformación en carga max. a flexión [%] | 4,222 |
| Módulo de elasticidad a flexión [Mpa] | 3380,597 |
| Densidad [g/cm³] | 1,254 |
| Propiedades térmicas | |
| Temperatura de fusión [°C] | 204,37 |
| Tensión de transición vítrea [°C] | 59,99 |

El proceso de producción del filamento se definió con base en el modelo de fabricación que se obtuvo de la entrevista con la empresa de apoyo (ver anexo 2) y realizando las modificaciones necesarias para implementar el uso de material reciclable de PLA, el diagrama de flujo del proceso se puede observar en la Fig. 25

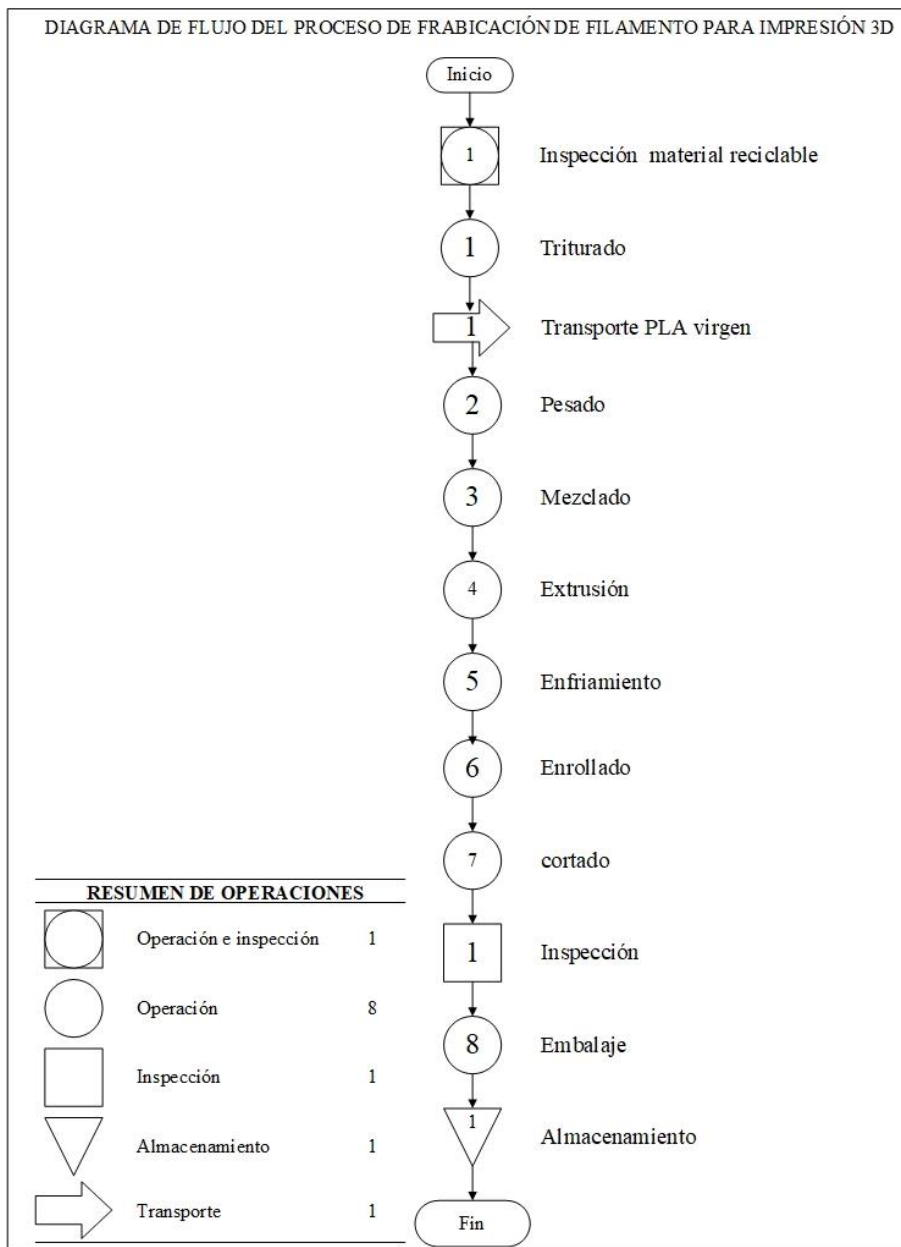


Fig. 25. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de filamento para impresión 3D

El proceso comienza con la inspección y selección del material reciclable separando piezas y sustancias diferentes al PLA, para ser triturado en un molino de golpe hasta obtener gránulos, después se inspecciona visualmente el material virgen previniendo que se pueda filtrar partículas o material extraño, una vez esta lista la materia prima, se pesa tanto el material virgen como reciclado para garantizar las proporciones y el cumplimiento de los requisitos de la demanda, terminado el pesaje se vierte el PLA virgen y reciclado en una mezcladora para homogenizar la mezcla, la cual se coloca en la extrusora para poder formar el filamento.

Una vez comienza a salir el filamento, este pasa sobre un ventilador que lo enfría, para posteriormente ser enrollado en una bobina de plástico con ayuda de una máquina, después se corta el filamento, se retira el rollo con un kilogramo de PLA y se lo reemplaza por una bobina vacía, después se inspecciona de manera visual el filamento, por último, es empacado y almacenado.

Con el fin de determinar el tamaño del proyecto, y además definir el mercado objetivo, se realizó una proyección de las ventas con base en el sondeo realizado a consumidores de filamento para impresión 3D en Colombia (ver anexo 5), donde se estimó la demanda potencial de los consumidores de este producto en Colombia a partir del consumo de rollos de filamento para impresión 3D en un periodo mensual asociado a la población objetivo del producto. Debido a la complejidad de realizar un estudio de mercado por ser un producto para un mercado segmentado, se asumió un cubrimiento del 10% para el primer año de la demanda total calculada, con un crecimiento del 5% para los años posteriores. De esta misma forma, se determinó la disponibilidad de residuos sólidos de PLA, proyectando la cantidad de material reciclado generado por la demanda de rollos mensuales. El procedimiento, y el material reciclado necesario para el cumplimiento de la demanda. En la TABLA XV se encuentra sintetizada la información de la demanda a cubrir para cada uno de los años del proyecto y la cantidad de material reciclado para la producción.

TABLA XV.
PRONÓSTICO DE LA DEMANDA DE PLA

| | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 | Año 2025 | Año 2026 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| Demanda potencial de rollos anual del mercado | 191277 | 200840 | 210882 | 221427 | 232498 |
| Proyección de ventas atendida anual | 19127 | 20084 | 21088 | 22143 | 23250 |
| Residuos anuales de PLA disponibles para reciclado en Kg | 17119 | 17975 | 18874 | 19818 | 20809 |
| Cantidad de PLA reciclado aprovechado anual | 1913 | 2009 | 2109 | 2215 | 2325 |
| Cantidad de PLA virgen necesario anual | 17215 | 18076 | 18980 | 19929 | 20925 |

Con base a lo anteriormente mencionado, se planteó una serie de requisitos necesarios para el sistema de producción de materia prima para impresión 3D a partir de residuos sólidos de PLA:

- El sistema debe de tener una capacidad mínima de producción de 78 rollos de filamento por día.
- La capacidad de reciclaje del sistema tendría que ser de al menos 7,8 Kg de PLA por día.
- Las restricciones de los espacios de almacenamiento deben contar con la capacidad de almacenaje de mínimo 842,4 Kg para una rotación cada dos semanas de PLA virgen, de 46,8 Kg para una rotación semanal de PLA reciclado y de 468 Kg de producto terminado con una rotación semanal.
- La planta de producción debe contar con las máquinas específicas para procesar el PLA reciclado, realizar un control de calidad y la fabricación del filamento. La cantidad de máquinas se definieron a partir de la demanda diaria y la capacidad de los equipos y recursos.
- El número de operarios se calcula a partir de la cantidad de turnos por día, y las horas establecidas por turno, cumpliendo los requisitos de demanda diaria.
- Es necesario un supervisor de producción para garantizar un óptimo funcionamiento de la planta.
- Se debe cumplir con el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), establecido por el ministerio de trabajo de Colombia. Institucional y jurídicamente fue determinado mediante el Decreto 1072 de 2015.

1) *Maquinaria y equipos requeridos*

Teniendo en cuenta lo anterior, se estableció la maquinaria necesaria y sus características, para poder cumplir con los requisitos de la producción, adicionalmente, se realizó un estudio para definir los tiempos de producción y el número de operarios necesarios, además de determinar los equipos para el almacenamiento de materia prima y producto terminado teniendo en cuenta las políticas de inventario propuestas por el equipo (ver anexo 13), la información resumida se encuentra en la TABLA XVI y la TABLA XVII. En cuanto a las máquinas necesarias para la producción de filamento se puede observar los equipos en la Fig. 26 y la información detallada de cada uno en el anexo 14.

TABLA XVI.
REQUISITOS PARA PRODUCCIÓN DE FILAMENTO

| Maquinaria necesaria n la producción de filamento | | | |
|---|----------------------------------|-----------|--------------------|
| Máquinas | Proceso | Capacidad | Numero de máquinas |
| Molino viper para plástico reciclable - serie 8 [33] | Triturado de PLA reciclado | 86 Kg/h | 1 |
| Bascula industrial [34] | Pesado de PLA virgen y reciclado | 150 Kg | 1 |
| Mezclador vertical de plástico y acero inoxidable[35] | Mezcla PLA virgen y reciclado | 50 Kg | 1 |
| Extrusora-Filabot EX6 Extruder[36] | Extrusión del filamento | 4,5 Kg/h | 2 |
| Enfriamiento- Filabot Airpath[37] | Enfriamiento del filamento | | |
| Enrollado-Filabot Spooler[38] | Enrollado del filamento | | |

| Tiempo de producción y operarios | | | |
|----------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Operación | Tipo de operación | Tiempo en h/Día | Numero de Operarios |
| Inspección | Manual | 1,30 | 0,081 |
| Triturado | Máquina | 1,00 | 0,063 |
| Pesado | Manual | 0,07 | 0,004 |
| Transporte | Manual | 0,20 | 0,013 |
| Mezclado | Máquina | 0,33 | 0,021 |
| Extrusión | Máquina | 9,00 | 0,563 |
| Enfriamiento | | | |
| Enrollado | | | |
| Cortado | Manual | 1,30 | 0,081 |
| Embalaje | Manual | 1,30 | 0,081 |
| Almacenado | Manual | 0,20 | 0,013 |
| Totales | | 14,7 | 0,919 |

TABLA XVII.
REQUISITOS DE ALMACENAJE

| Política de inventarios materia prima(MP) | | |
|---|---------------------------|-------------------|
| Material | Re-orden | Unidades |
| Caja 10k PLA virgen | 2 Semanas | 85 |
| Caja 10k PLA reciclado | 1 semana | 55 |
| Bobinas | 1 semana | 468 |
| Almacenaje MP | | |
| Equipo para almacenar MP | Cantidad de MP por equipo | Número de equipos |
| Estiba PLA virgen | 32 | 3 |
| Estiba PLA reciclado | 32 | 1 |
| Estiba PLA bobina | 540 | 1 |
| Almacenaje producto terminado (PT) | | |
| La rotación de inventario es semanalmente | | |
| Equipo para almacenar MP | Cantidad de MP por equipo | Número de equipos |
| Esterantería | 144 | 4 |



Fig. 26. Equipos necesarios en la fabricación de filamento para impresión 3D [33] [34] [35] [36] [37] [38].

2) Planeación del sistema de producción

Habiendo definido en el estudio técnico la cantidad de máquinas para los diferentes procesos, y el método para el almacenamiento tanto de materia como producto terminado, se procedió a realizar el diseño y distribución de planta mediante el método de Planeación Sistemática de Distribución (por sus siglas en inglés SLP). El método SLP tiene como objetivo principal mejorar la productividad dentro de las empresas, a través de la reducción del recorrido, espacios innecesarios, congestiones que puedan ralentizar el proceso y garantizando la seguridad del operario. El procedimiento para el desarrollo del SLP se encuentra dividido en cuatro fases: la Fase I se encuentra relacionado con definir la zona en donde será ubicada la plantada, en la Fase II se realiza una distribución generalizada de la planta en la cual solo se ubican los departamentos principales de esta, la Fase III se hace de forma detallada la ubicación de las maquinarias y equipos dentro de planta. Por último, se tiene la Fase IV que permite implementar los diseños elaborados en las anteriores fases, considerando las posibles limitaciones.

La Fase 1 de macrolocalización, se determinó a partir de la ubicación de los comerciantes del sector de la manufactura aditiva en la ciudad de Santiago de Cali, definiendo las coordenadas de cada establecimiento, El propósito es que la planta esté ubicada de forma estratégica permitiendo reducir la distancia entre los posibles clientes que, además, podrán brindar el PLA reciclado. Se empleó la herramienta de Solver en Microsoft Excel, para minimizar la distancia de la zona de la planta (ver anexo 15). La solución obtenida con la optimización sugiere ubicar la planta en el barrio Guayaquil como se observa en la Fig. 277

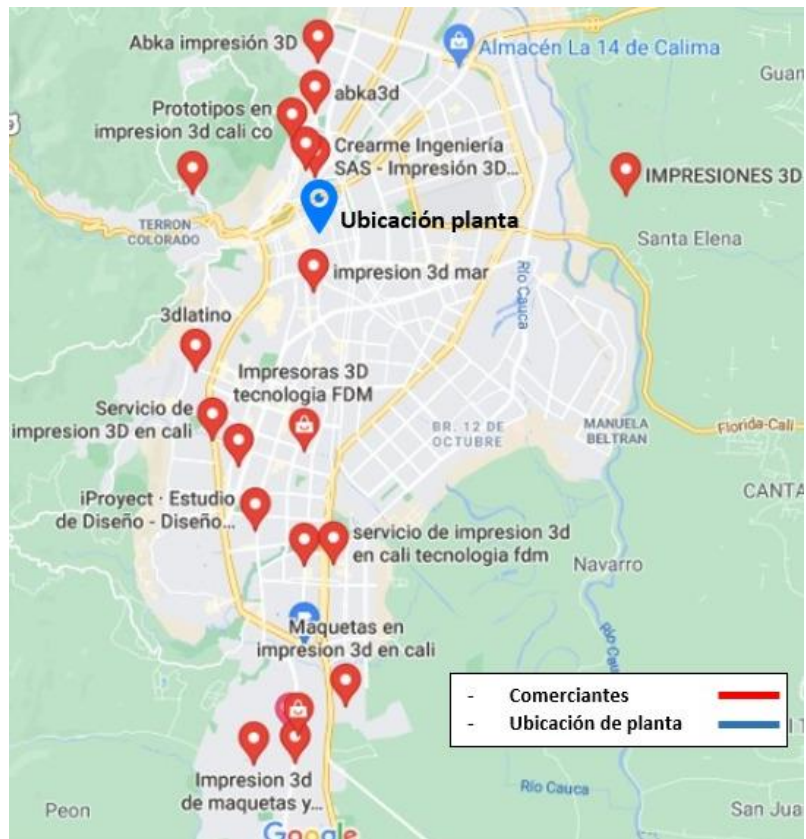


Fig. 27. Localización de planta

Dando continuación a la metodología SLP, en la Fase II, se hizo la distribución de forma general de la planta, donde el equipo de trabajo definió los departamentos que deben existir para la operación y definir las relaciones ya sea a través del flujo o secuencia del proceso, para así construir la matriz de relaciones entre departamentos. La matriz se simboliza bajo una calificación de proximidad tomando valores entre A, E, I, O y X, como se muestra en la TABLA XVIII y en la TABLA XIX, se puede observar la puntuación dada para las relaciones por cada uno de los departamentos.

*TABLA XVIII.
VALORES Y CALIFICACIÓN*

| Valor | Cercanía |
|-------|--------------------------|
| A | Absolutamente necesaria |
| E | Especialmente importante |
| I | Importante |
| O | Ordinaria |
| U | Sin importancia |
| X | No deseable |

*TABLA XIX.
MATRIZ DE RELACIONES POR DEPARTAMENTO*

| Departamentos | Almacén MP | Almacén PT | Oficinas | Baños | Triturado | Control de calidad | Inspección | Producción filamento |
|----------------------|------------|------------|----------|-------|-----------|--------------------|------------|----------------------|
| Almacén MP | - | U | U | U | A | U | A | A |
| Almacén PT | U | - | U | X | U | A | O | A |
| Oficinas | U | U | - | I | U | U | U | U |
| Baños | U | X | I | - | O | O | O | O |
| Triturado | A | U | U | O | - | I | E | E |
| Control de calidad | U | A | U | O | I | - | U | E |
| Inspección | A | O | U | O | E | U | - | I |
| Producción filamento | A | A | U | O | E | E | I | - |

Continuando con la metodología, es necesario establecer los requisitos de espacio por departamento. En consecuencia, se utilizó el método Guerchet el cual permite calcular el área total requerida teniendo en cuenta la superficie parcial estática ocupada por las maquinarias, la superficie de gravitación siendo el espacio ocupado por los operarios y materiales necesarios. Por último, la superficie de evolución que considera las zonas de desplazamiento y manutención. La siguiente parte del proceso fue establecer diferentes propuestas de distribución para la planta, la generación de las propuestas se hizo a través de dos algoritmos. El primer método consiste en realizar un cálculo de una puntuación de proximidad entre departamentos (TCR), el segundo es desarrollado en base a las áreas calculadas por el método Guerchet relacionados con el factor de mayor importancia (tipo A), procediendo a ordenar según las prioridades dadas. En el anexo 15 se observa de forma detallada el procedimiento paso a paso y las diferentes propuestas elaboradas.

La selección final entre las propuestas de distribución, es mediante la evaluación de los criterios de relación y proximidad estableciendo, por esto, se obtuvo que la propuesta 2 sería la más adecuada con una eficiencia del 84%, la propuesta de distribución de planta se puede observar en la Fig. 28 y el diagrama de relación de actividades en la Fig. 29

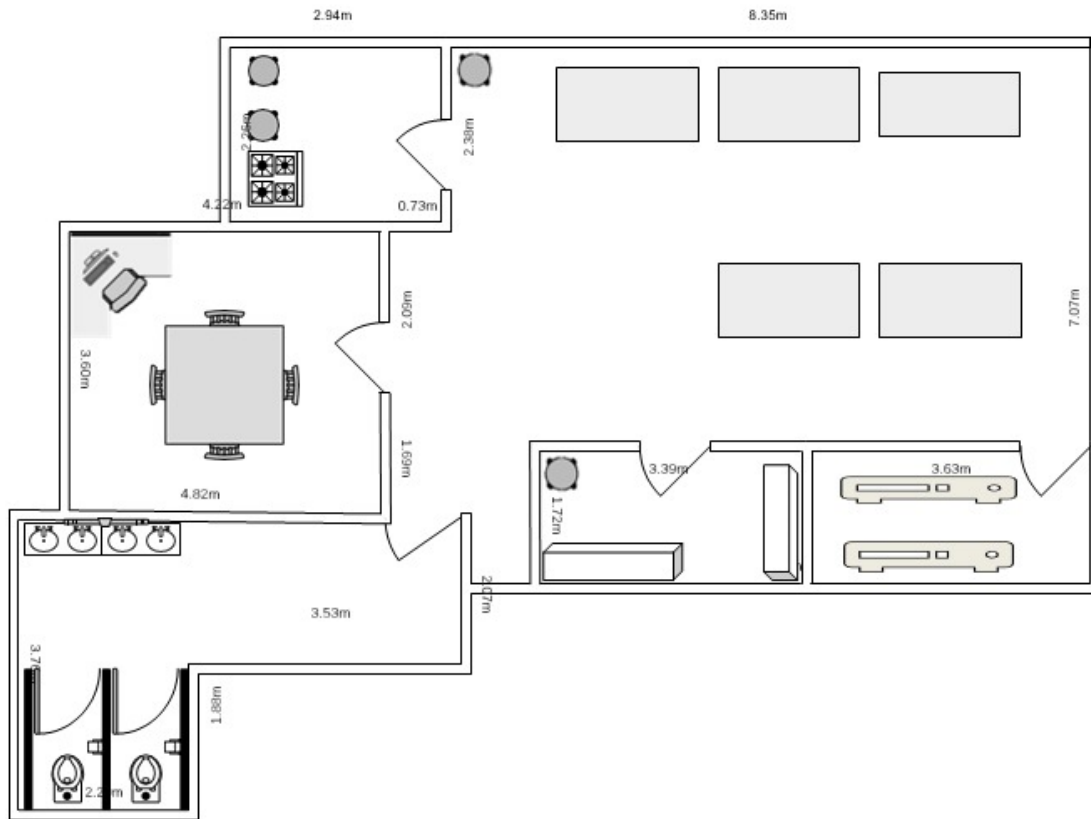


Fig. 29. Propuesta distribución general de la planta

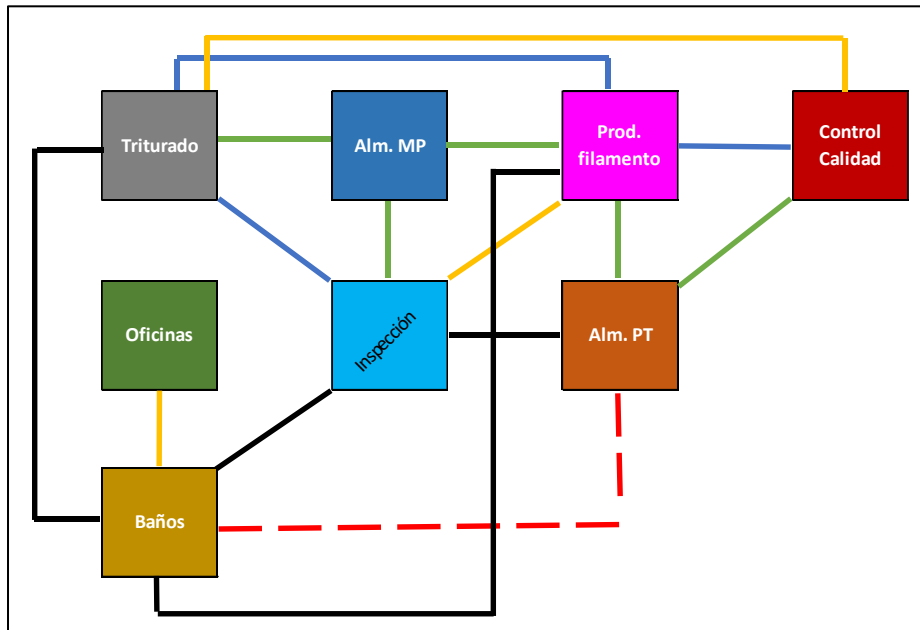


Fig. 28. Diagrama de relación de actividades

3) Requerimientos de mano de obra

Después de calcular los tiempos y recursos necesarios para la producción y almacenamiento, se realizó un modelo simulado del sistema de fabricación de filamento empleando la herramienta SIMIO (ver anexo 16), con el cual se pudo verificar los datos presentados anteriormente al compararlos con el reporte de la simulación (ver anexo 17), con base en lo anterior se tomó la decisión de implementar dos turnos de ocho horas dando un total de 16 h/día por seis días a la semana y un operario por turno, cumpliendo con los requerimientos de producción. Dicho lo anterior se necesitan dos operarios por día, estableciendo un sueldo mensual de un salario mínimo mensual legal vigente (SMMLV) en Colombia, equivalente a \$908.526 pesos basados en el salario promedio de un operario en Colombia equivalente a \$ 954.389 pesos colombianos mensuales [39], el auxilio de transporte será de \$106.454 pesos mensuales, a esto se le suma la carga prestacional y de seguridad social. Además del operario, es necesario contratar un supervisor de operaciones, para mantener un control de procesos y verificación, el cual tendrá un salario de \$1403.667 pesos colombianos mensuales [40] más prestaciones.

B. Validación del diseño propuesto

Con el fin de validar el diseño del filamento y el material seleccionado, se realizaron pruebas de prototipado mediante el proceso de extrusión, usando una extrusora equipada con un dado para obtener filamentos con diámetros de 1.75 mm (ver Fig. 30), inicialmente se procesó material virgen a una temperatura de 155°C obteniendo un filamento consistente de diámetro 1,75mm \pm 0,20mm (ver Fig. 30). Después al extruir material con proporciones 90/10 de virgen y reciclado respectivamente, se presentaron dificultades debido a la forma de los pellets (irregular) y al cambio en las propiedades en la reología del material debido al acortamiento de las cadenas poliméricas, en los procesos de extrusión y triturado en los diferentes ciclos afectando la viscosidad y el flujo del material. Además, la forma irregular de los pellets generó que el material se acumulara entre el tornillo y el cilindro de extrusión impidiendo el procesamiento continuo del material. Con el propósito de minimizar los efectos mencionados anteriormente, se realizó variaciones en la temperatura de extrusión sin concretar un parámetro que permitiera obtener un prototipo del filamento consistente con la proporción del material seleccionado (ver Fig. 30).

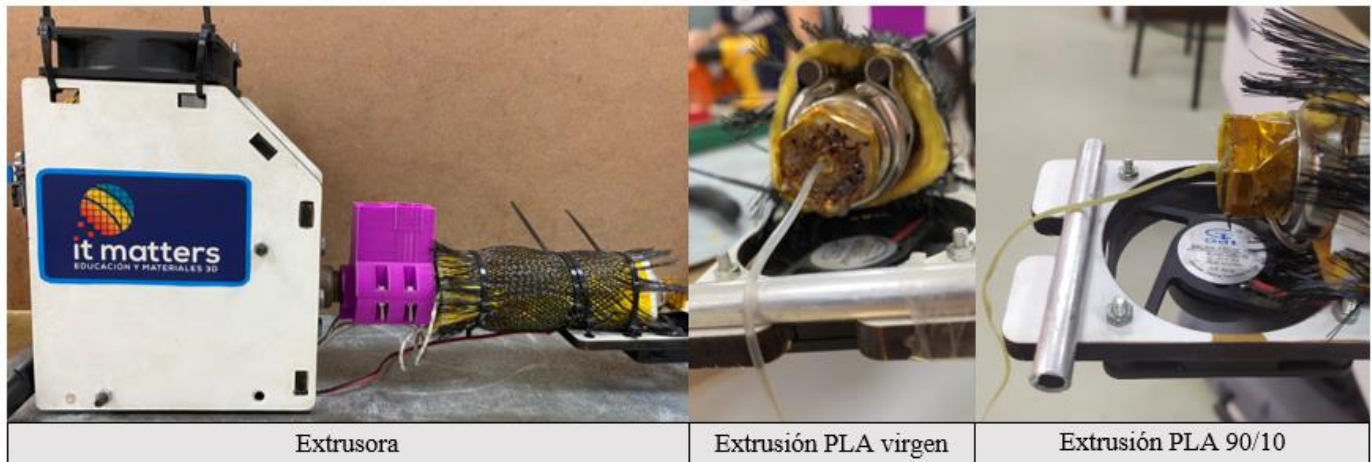


Fig. 30. Proceso de prototipado

Para la validación del diseño de producción de filamento para impresión 3D, se consideró el tiempo disponible de trabajo, la capacidad de las máquinas, los tiempos de procesamiento y los requerimientos de insumos o recursos. Adicionalmente, fue necesario tener en cuenta la secuencia que se muestra en el diagrama de flujo del proceso presentado anteriormente. Para la simulación se empleó el software SIMIO, en el cual se desarrolló un modelo virtual para observar el comportamiento del sistema productivo (ver anexo 16), en la Fig.31, se presenta el modelo elaborado en SIMIO.

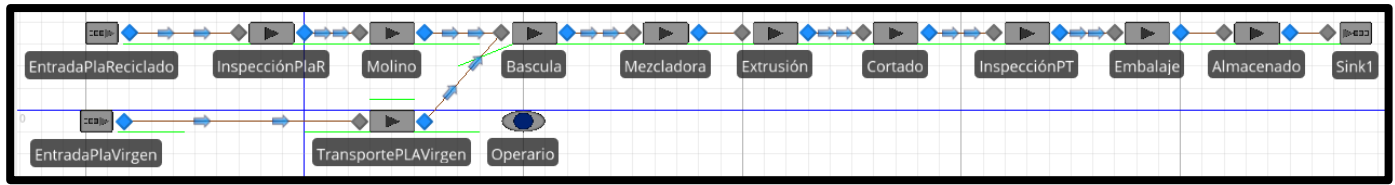


Fig. 31. Modelo en SIMIO de producción de filamento para impresión 3D a partir de residuos de PLA.

Una vez definida la secuencia de producción se definieron los parámetros, estableciendo tiempos, capacidades y recursos necesarios. La simulación se realizó con base en el cumplimiento de la demanda diaria de rollos de PLA (78 rollos día, cada uno de un kilogramo), en el reporte de la simulación (ver anexo 17), se pudo observar que los datos son semejantes a los calculados en los requisitos para la producción de filamento, para cumplir con la producción diaria son necesarios 14,7 h/día, por este motivo se decide implementar dos turnos de ocho horas que en total son 16 h/día con un solo operario por turno, por lo cual se tiene una holgura de 1,35 horas, destinadas al descanso del empleado, cambio de turno y necesidades fisiológicas, además de posibles ineficiencias en el proceso. En cuanto a las máquinas se tiene que el porcentaje de utilización del molino, báscula y mezcladora es menor al 2%, estas máquinas son necesarias para el proceso de aprovechamiento de PLA reciclado, pero el tiempo de utilización es reducido debido a la cantidad de material reciclado y la velocidad de los procesos, las máquinas en el proceso de extrusión como la extrusora, ventilador y la máquina enrolladora tienen una utilización de 54,43% y los operarios de 81,56%.

Por último, para validar el cumplimiento de los KPI's (ver TABLA XX), se recopiló la información obtenida en las anteriores etapas del proyecto, para la eficiencia de reciclado se calculó teniendo en cuenta la relación entre los residuos de PLA aprovechados en la fabricación del filamento y la disponibilidad esperada de residuos. La relación de PLA/PLA-R se determinó mediante el análisis de los ensayos físico-mecánicos del material, el costo de reciclaje se determinó mediante el costo de transporte y el costo del consumo energético en el proceso de molido de PLA reciclado. Finalmente se definió la utilidad del producto como la diferencia entre el precio de venta y el costo unitario de producción, los cuales fueron obtenidos en el análisis de factibilidad financiera.

TABLA XX.
RESULTADOS DE KPI's

| Indicadores de desempeño (KPI's) | Resultados | Meta |
|---|---------------|----------------|
| Eficiencia del reciclado | 11,17% | ≥10% |
| Relación de mezcla de material virgen y reciclado | 10% Reciclado | ≥10% Reciclado |
| Costo de reciclaje por rollo | \$ 561 COP | Minimizar |
| Utilidad del producto por rollo | \$ 31.782 COP | Maximizar |

VI. VERIFICAR

A. Medición de los impactos

Seguido de haber definido el diseño de producción para el filamento, es importante realizar la medición del impacto financiero de la propuesta, para ello se realizó un estudio de factibilidad financiera del proyecto, donde se analizó los costos influyentes en la implementación del sistema y los costos de materia prima asociados a la elaboración de un rollo de filamento de PLA. Posteriormente de haber identificado los costos directos e indirectos de fabricación, se estableció el precio de venta para la presentación de un rollo de filamento de PLA/PLA-R de 1 Kg, finalmente se elaboró el estado de resultados y los flujos de caja del proyecto y del inversionista para un horizonte de 5 años.

La primera etapa para el análisis financiero, fue la determinación de la demanda anual de rollos de filamento de PLA/PLA-R, siendo definida previamente en la etapa Diseñar. Para la obtención de los costos de materia prima, se tuvo en cuenta la cotización con la empresa Químicos Plásticos S.A.S para el PLA virgen, con respecto a los costos asociados a la obtención del PLA reciclado, se tuvo en cuenta el costo del flete, a esto se le añadió los costos relacionados al salario de los operarios y los costos indirectos de fabricación tales como el mantenimiento de las máquinas, los servicios y el salario del operario encargado de supervisar la producción, obtenido así un costo unitario por rollo de filamento de aproximadamente \$23.218 COP. Posteriormente, se calculó el requerimiento de capital para inversión en activos fijos siendo un valor de \$505.082.045 COP, donde se consideran los valores

de adquisición de los equipos de producción, el equipo para el almacenamiento de la materia prima y producto terminado, y la adquisición de una planta en el barrio Guayaquil de la ciudad de Santiago de Cali con los respectivos costos de obra blanca para las adecuaciones necesarias. Los activos fijos adquiridos y el precio de adquisición, se pueden observar en la TABLA XXI.

TABLA XXI.
ACTIVOS FIJOS ADQUIRIDOS Y PRECIO DE ADQUISICIÓN.

| Activos Fijos | Valor |
|----------------------------------|---------------|
| Molino viper serie 8 | \$ 20.550.000 |
| Mezclador vertical de plástico | \$ 1.432.541 |
| Extrusora - Filabot EX6 Extruder | \$ 27.095.191 |
| Enfriamiento - Filabot Airpath | \$ 2.638.303 |
| Enrollado Filabot Spooler | \$ 8.459.151 |
| Bascula | \$ 200.000 |
| Estibas (x5) | \$ 1.000.000 |
| Estantería de PT (x4) | \$ 1.428.000 |
| Inversión en obra blanca | \$ 36.735.110 |

Para la determinación del precio de venta del producto, se realizó un *benchmarking* del precio de venta de los rollos de PLA virgen que se pueden obtener en el mercado, estableciendo un precio por debajo del rollo más económico encontrado, para un valor de \$55.000 COP siendo un precio aproximadamente menor al 40,49% del valor promedio que se encuentra en el mercado. Por último, se establecieron las políticas de la empresa, donde la rotación de la cartera y de cuentas por pagar a proveedores fuera de cero días debido a que tanto las ventas a los clientes como los pagos a los proveedores serian de contado; la política de la rotación de inventarios fue de siete días con el fin de disminuir el capital de trabajo invertido y ser más eficientes en su uso.

Habiendo determinado los costos y precios de venta del producto, se realizó el estado de resultados del proyecto con un horizonte de cinco años, donde se tuvieron en cuenta únicamente los costos de producción y los gastos financieros, con el fin de determinar la viabilidad económica del proyecto, cabe resaltar que para la análisis de factibilidad no se tuvo en cuenta los gastos operaciones en los cuales se incluyen los gastos de administración y venta, esto se debió a que se buscaba mirar la viabilidad del proyecto solo en el proceso productivo. Una vez obtenida la utilidad neta del proyecto, como se puede evidenciar en la Fig. 32. La proyección de los costos para el horizonte de evaluación se hizo a partir del índice de Precios al Productor (IPP) manejando una tasa de 1,6% en los 5 años, el aumento del precio de venta se manejó con las proyecciones de la Inflación Anual o Índice de Precio al Consumidor con una tasa de 2,4% para el primer año, y manejando una tasa del 3% en los otros cuatro años de evaluación, estos datos fueron obtenidos del el Banco de la Republica [41].

| MOMENTO 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| VENTAS NETAS | \$ 1.051.985.000 | \$ 1.137.721.778 | \$ 1.230.446.102 | \$ 1.330.727.460 | \$ 1.439.181.748 |
| COSTO DE VENTAS | \$ 444.090.686 | \$ 473.755.944 | \$ 505.402.841 | \$ 539.163.751 | \$ 575.179.889 |
| INVENTARIO INICIAL | 8.635.097 | 9.211.921 | 9.827.277 | 10.483.740 | 11.184.053 |
| MAS: COMPRAS | 8.635.097 | 444.667.510 | 474.371.300 | 506.059.303 | 539.864.064 |
| MENOS: INVENTARIO FINAL | 8.635.097 | 9.211.921 | 9.827.277 | 10.483.740 | 11.184.053 |
| UTILIDAD BRUTA | \$ 607.894.314 | \$ 663.965.834 | \$ 725.043.261 | \$ 791.563.709 | \$ 864.001.858 |
| GASTOS OPERACIONALES | | | | | |
| Gastos de Ventas | | | | | |
| + Depreciación equipos | 9.836.783 | 9.836.783 | 9.836.783 | 9.836.783 | 9.836.783 |
| EBITDA | 617.731.097 | 673.802.617 | 734.880.045 | 801.400.492 | 873.838.642 |
| Depreciaciones y amortizaciones | 9.836.783 | 9.836.783 | 9.836.783 | 9.836.783 | 9.836.783 |
| EBIT | 607.894.314 | 663.965.834 | 725.043.261 | 791.563.709 | 864.001.858 |
| - Gastos financieros | 49.154.058 | 41.849.746 | 32.888.086 | 21.893.025 | 8.403.185 |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS | 558.740.256 | 622.116.088 | 692.155.176 | 769.670.684 | 855.598.674 |
| Provisión impuesto de renta | 173.209.479,4 | 186.634.826,3 | 207.646.552,7 | 230.901.205,2 | 256.679.602,1 |
| UTILIDAD NETA | 385.530.777 | 435.481.261 | 484.508.623 | 538.769.479 | 598.919.072 |

Fig. 32. Estado de resultados para proyecto de producción de filamento a base de material reciclado.

Se realizó el flujo de caja libre (FCL) para el proyecto, siendo estos los valores de ganancia obtenidos como se puede observar en la Fig. 33. Para determinar los beneficios obtenidos para el inversionista, después de haber descontado los gastos financieros, y las amortizaciones de las obligaciones bancarias, se elaboró el Flujo de Caja Libre del Inversionista (FCLI) que se observa en la Fig. 34, en el cual se tiene en cuenta los aportes de capital realizados por los inversionistas. Se determinó una estructura de financiación del proyecto del 50% por parte de los inversionistas y la otra parte siendo financiada a partir de un crédito, donde la tasa de financiación se obtuvo del promedio de las tasas de préstamo de diferentes entidades bancarias (ver anexo 18).

| FLUJO DE CAJA LIBRE | MOMENTO 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|---|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| EBITDA | | \$ 617.731.097 | \$ 673.802.617 | \$ 734.880.045 | \$ 801.400.492 | \$ 873.838.642 |
| Menos: Impuesto de renta | | \$ 191.496.640 | \$ 202.140.785 | \$ 220.464.013 | \$ 240.420.148 | \$ 262.151.592 |
| Flujo Operacional Después de Impuestos | | \$ 426.234.457 | \$ 471.661.832 | \$ 514.416.031 | \$ 560.980.345 | \$ 611.687.049 |
| Menos: Inversión en Capital de Trabajo | | \$ 9.211.921 | \$ 615.356 | \$ 656.462 | \$ 700.314 | -\$ 11.184.053 |
| Menos: Inversión en activos fijos | \$ 505.082.045 | | | | | |
| Menos: Saldo Mínimo de Caja | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - |
| Flujo de Caja Libre Operacional | -\$ 505.082.045 | \$ 417.022.536 | \$ 471.046.475 | \$ 513.759.569 | \$ 560.280.031 | \$ 622.871.103 |

Fig. 33. Flujo de Caja Libre de la operación

| FLUJO DE CAJA LIBRE | MOMENTO 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|---|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Utilidad neta | | \$ 385.530.777 | \$ 435.481.261 | \$ 484.508.623 | \$ 538.769.479 | \$ 598.919.072 |
| + Depreciación equipos | | \$ 9.836.783 | \$ 9.836.783 | \$ 9.836.783 | \$ 9.836.783 | \$ 9.836.783 |
| Flujo de Caja Bruto Después de Impuestos | | \$ 405.765.755 | \$ 445.318.044 | \$ 494.345.406 | \$ 548.606.262 | \$ 608.755.855 |
| Menos: Inversión en Capital de Trabajo | | \$ 9.211.921 | \$ 615.356 | \$ 656.462 | \$ 700.314 | -\$ 11.184.053 |
| Menos: Inversión en activos fijos | \$ 505.082.045 | | | | | |
| Menos: Saldo Mínimo de Caja | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - |
| Flujo de Caja | -\$ 505.082.045 | \$ 396.553.834 | \$ 444.702.688 | \$ 493.688.944 | \$ 547.905.948 | \$ 619.939.908 |
| Aportes de capital | \$ 252.541.022 | | | | | |
| Préstamos bancarios de L-P- | \$ 252.541.022 | | | | | |
| Amortización de Obligaciones bancarias | | \$ 32.191.766 | \$ 39.496.078 | \$ 48.457.738 | \$ 59.452.799 | \$ 72.942.639 |
| Flujo de caja Libre del inversionista | \$ - | \$ 364.362.067 | \$ 405.206.610 | \$ 445.231.205 | \$ 488.453.149 | \$ 546.997.269 |

Fig. 34. Flujo de Caja Libre del Inversionista

Posteriormente de obtener los FCL, se emplearon tres criterios para determinar si el proyecto de forma determinística era factible financieramente desde el punto de vista de la operación y del inversionista, para ello se usó el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el índice de relación Beneficio/Costo. El cálculo del VPN, la TIR y el Índice B/C para el flujo de caja libre se hizo a partir de haber obtenido un Weighted Average Cost of Capital (WACC) de 19,94%, del cual los flujos en el horizonte financiero fueron traídos a un valor presente con la tasa del WACC, sumándose en un mismo periodo de tiempo y descontando la inversión en activos fijos del periodo de desarrollo del proyecto. Este proceso se desarrolló nuevamente para el FCLI, donde a diferencia de traer los flujos de los periodos con el WACC, se usó la Tasa Interna de Oportunidad (TIO) establecida en el 24% por el equipo de trabajo. En la TABLA XXII se puede observar los resultados obtenidos de los diferentes indicadores, donde los valores obtenidos por el FCL serán mayores a los del FCLI debido a que para el segundo, es necesario descontar las obligaciones y gastos financieros del proyecto; con respecto a los resultados, se obtuvo que tanto para el FCL y el FCLI, se obtuvieron valores del VPN mayores que cero (En el caso del FCL se obtuvo \$ 989.444.095 COP y en el FCLI fue de \$678.996.090) afirmando que se obtendrían un beneficio en el desarrollo del proyecto bajo las condiciones establecidas. El análisis de la TIR, se realiza comparando los resultados obtenidos con el WACC para el caso de FCL y la TIO en el FCLI, donde por ambas partes se obtuvieron TIR mayores. Por el ultimo, se analiza el Índice B/C en el cual se observa la razón entre los ingresos del proyecto, y los gastos realizados, donde se concluye que al ser el índice mayor que 1, se obtienen beneficios económicos del proyecto.

*TABLA XXII.
RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS CRITERIOS DE FACTIBILIDAD FINANCIERA*

| | VPN | TIR | Índice B/C | Periodo de recuperación |
|--------------------------------|----------------|--------|------------|-------------------------|
| Flujo de caja libre | \$ 989.444.095 | 87,76% | 2,70 | 2 |
| Flujo de caja libre del inver. | \$ 678.996.090 | 75,63% | 2,34 | 2 |

Una vez habiendo determinado los criterios para la factibilidad financiera del proyecto, se realizó un análisis de sensibilidad de las variables del precio de venta, costo unitario, demanda y tasa de inversión; buscando obtener los valores a los que podrían llegar las variables de forma independiente con el fin de obtener un VPN igual a cero. En el caso del precio de venta, se podría considerar establecer un precio no menor a \$38.913 COP, y el proyecto no presentaría pérdidas económicas para el FCLI, siendo la misma interpretación para las demás variables. Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad se pueden observar en la TABLA XXIII.

*TABLA XXIII.
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD*

| | Precio de venta | Costo unitario | Demanda | Tasa inversión |
|--------------------------------|-----------------|----------------|---------|----------------|
| Flujo de caja libre | \$ 33.353 | \$ 45.309 | 6.288 | 159,65% |
| Flujo de caja libre del inver. | \$ 38.913 | \$ 39.608 | 9.574 | 74,68% |

Con el objetivo de determinar el riesgo financiero asociado a la ejecución del proyecto, se empleó el software Risk Simulator, en el cual se establecieron las variables de entrada de costo unitario, demanda y tasa de financiación, como se puede observar en la TABLA XXIV, donde los valores de los parámetros para las diferentes distribuciones fueron obtenidos a partir del análisis de sensibilidad previamente hecho, para la tasa de financiación se estableció el valor mínimo y máximo de los investigados por las diferentes entidades bancarias y el valor máximo de la demanda según las capacidad de los equipos adquiridos para la producción. Estas variables fueron seleccionadas debido a que se pueden presentar fluctuaciones en los costos, o una disminución en la demanda establecida por los métodos de obtención.

*TABLA XXIV.
DISTRIBUCIONES Y PARAMETROS ESTABLECIDOS PARA LA SIMULACIÓN*

| Variable | Distribución | Parámetros |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| Demanda | Distribución triangular | (8500; 19127; 20200) |
| Costo unitario | Distribución triangular | (22500; 23218; 32000) |
| Tasa financiación | Distribución Uniforme | (0,14 ; 0,33) |

A continuación de haber establecido las variables, se elaboró una simulación de mil replicas con el propósito de encontrar el valor promedio del VPN y la TIR tanto para el FCL como para el FCLI. En la TABLA XXV, se encuentra los valores obtenidos en la simulación, donde se puede analizar que tanto para el FCL como para el FCLI se obtuvo una media de \$549.109.593 COP y \$260.544.059 COP, sin embargo, los intervalos de confianza generados con 95% de nivel de confianza, en el límite inferior para ambos flujos obtuvieron valores negativos, indicando que existe un riesgo de obtener pérdidas si se ejecuta el proyecto. Los resultados de la TIR arrojan la misma interpretación, ya que se puede observar que la media de la TIR tanto para el FCL como del FCLI superan el WACC y la TIO establecidas anteriormente, no obstante, se presenta un riesgo de que esta sea inferior.

*TABLA XXV.
RESULTADOS OBTENIDOS PARA VPN Y TIR EN LA SIMULACIÓN*

| | | | Resultado obtenido |
|-----|-----|----------|--------------------|
| FCL | VPN | Media | \$ 549.109.593 |
| | | Lim. Inf | -\$ 51.509.664 |
| | | Lim. Sup | \$ 1.150.788.651 |
| | TIR | Media | 58,79% |
| | | Lim. Inf | 15,34% |
| | | Lim. Sup | 92,61% |

| | | | Resultado obtenido |
|------|-----|----------|--------------------|
| FCLI | VPN | Media | \$ 260.544.059 |
| | | Lim. Inf | -\$ 273.148.443 |
| | | Lim. Sup | \$ 747.813.889 |
| | TIR | Media | 44,24% |
| | | Lim. Inf | -3,22% |
| | | Lim. Sup | 79,94% |

A partir de los diagramas de la Fig. 35, siendo estos elaborados por el software Risk Simulator, se puede observar la probabilidad de riesgo de obtener un VPN menor a 0, donde con un nivel de confianza del 95% se concluye que para el FCL existe un riesgo del 0,90% de que el proyecto genere perdidas a lo largo del horizonte financiero, por otro lado, para el FCLI con un nivel de confianza del 95% se obtiene un riesgo del 13,6% de que el VPN sea menor a cero y le genera pérdidas a los inversionistas del proyecto.

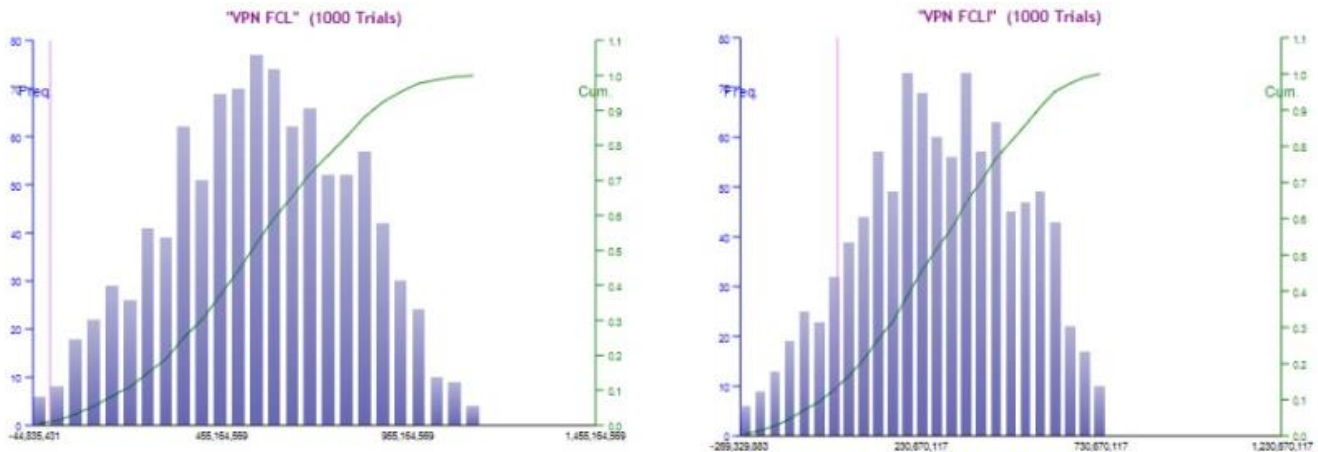


Fig. 35. Análisis de riesgo del VPN para el FCL y FCLI.

Por último, se realizó un análisis Tornado determinando las variables que mayor impacto generan en los resultados del VPN del FCLI, el grafico se puede observar en la Fig. 36, donde se aprecia que la variable que mayor impacto genera en el VPN es el precio de venta, donde un aumento en la variable según el análisis tornado se relacionaría con un aumento en el valor del VPN. Esta interpretación se cumple para el resto de las variables, donde por ejemplo para el caso del costo unitario una disminución de este valor significaría un incremento al VPN

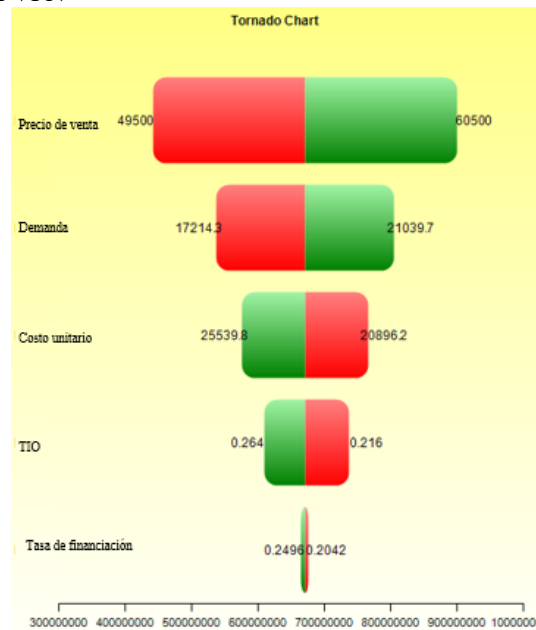


Fig. 36. Gráfico Tornado para análisis de sensibilidad y riesgo.

B. Estandarización de la solución

Con el fin de estandarizar el proceso de producción del filamento para impresión 3D a partir de residuos sólidos de PLA, se realizó un formato con el Procedimiento operativo estandarizado (POE), presente en la TABLA XXVI detallando las actividades y operaciones a realizar, con sus respectivos responsables, lo cual permite tener mayor claridad sobre el proceso, facilita la implementación del proyecto y el control del mismo en conjunto con el diagrama de flujo del proceso (ver Fig. 22), disponibles para aquellos interesados en la implementación del proyecto.

TABLA XXVI.
FORMATO POE PARA LA PRODUCCION DE FILAMENTO

| | | |
|---|--|--------------------------|
| LOGO DE LA EMPRESA | PROCESO DE FABRICACIÓN DE MATERIA PRIMA PARA IMPRESIÓN 3D A PARTIR DE RESIDUOS DE PLA | Versión: Vigencia: |
| OBJETIVO | | |
| Estandarizar el proceso de fabricación de filamento de PLA para impresión 3D a partir de residuos solidos | | |
| ALCANCE | | |
| Aplica a encargados y operarios de planta y ce centra en las actividades y operaciones en la fabricación de filamento de PLA con material reciclado | | |
| DEFINICIONES | | |
| PLA: Polímero termoplástico usado en la fabricación del filamento para impresión 3D. | | |
| Extruir: Proceso en el que se moldea material hasta obtener forma de filamento. | | |
| Filamento: Material con cuerpo en forma de hilo usado en la fabricación de piezas en impresoras 3D. | | |
| Bobina: Elemento de forma cilíndrica donde es enrollado el filamento. | | |
| ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL | | |
| -Gafas de seguridad -Botas de seguridad -Guantes de látex | | |
| PROCESO DE PRODUCCIÓN | | |
| Paso | Descripción del procedimiento | Cargo responsable |
| 1 | Recepción de materias primas y PLA reciclado | Supervisor de producción |
| 2 | Inspección de material reciclado, separar piezas y sustancias diferentes al PLA | Operario |
| 3 | Precalear extrusora | Operario |
| 4 | Moler PLA reciclado | Operario |
| 5 | Pesar PLA reciclado | Operario |
| 6 | Pesar PLA virgen | Operario |
| 7 | Mezclar PLA virgen y reciclado | Operario |
| 8 | Extruir filamento de la mezcla de PLA virgen y reciclado | Operario |
| 9 | Enfriado del filamento de PLA | Operario |
| 10 | Colocar bobina de filamento vacía | Operario |
| 11 | Enrollado del filamento de PLA | Operario |
| 12 | Corte de filamento de PLA | Operario |
| 13 | Cambio de bobina | Operario |
| 14 | Inspección de filamento terminado: medición de diámetro y pesaje. | Operario |
| 15 | Registro de producto | Operario |
| 16 | Embalaje de producto terminado | Operario |
| 17 | Almacenar producto final en el área de producto terminado | Operario |
| 18 | Supervisar niveles de inventario | Supervisor de producción |
| RESPONSABLE | | |
| Supervisor de producción | | |
| REGISTRO | | |

| | | |
|---|--|-------------------------|
| Paso donde se genera el registro | Nombre del registro | Lugar de archivo |
| 15 | Formato registro de producto terminado | Oficina de la planta |
| Elaborado por: | Revisado por: | Aprobado por: |
| Lugar: | | |
| Fecha: | | |

En cuanto al control de producto final, se elaboró un formato en el cual se registra la producción de filamento semanal, registrando las cantidades de rollos de filamento producido, número de productos conformes y defectuosos, además de registrar los defectos encontrados en cada rollo de filamento considerado como defectuoso, el formato se puede evidenciar en la Fig. 37.

| LOGO DE LA EMPRESA | REGISTRO DE PRODUCTO TERMINADO | | | | | | Hoja 1 de 1 |
|---|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Producto: | | | | | | | |
| Diligenciado por: | | | | | | | |
| Fecha inicio: | | | | | | | |
| Fecha fin: | | | | | | | |
| Número total de producto terminado | | | | | | | |
| Número de productos conformes | | | | | | | |
| Número de productos defectuosos | | | | | | | |
| Registro de producto defectuoso | | | | | | | |
| | Frecuencia | | | | | | |
| Defectos | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 5 | Día 6 | Total |
| Diámetro | | | | | | | |
| Color | | | | | | | |
| Peso | | | | | | | |
| Otro | | | | | | | |
| Total | | | | | | | |

Fig. 37. Formato registro de producto terminado

C. Conclusiones

- En el análisis de los datos obtenidos en los ensayos de tensión, flexión y densidad, se puede evidenciar que la adición de PLA-R al PLA causa una degradación de las propiedades físico-mecánicas en proporción a la cantidad de material reciclado añadido, a lo anterior se suman factores como la falta de homogeneidad de las mezclas resultando en una alta variedad de sus propiedades.
- A partir de la elaboración de los ensayos de tensión, flexión y densidad se logró determinar que la proporción de mezcla de PLA/PLA-R que obtuvo mayor similitud en las propiedades físico-mecánicas de PLA virgen es de 90/10 siendo el más adecuado para la producción del filamento susceptible de ser usado en la impresión 3D.
- Realizando una calorimetría diferencial de barrido (DSC), se obtuvo las propiedades térmicas del PLA virgen y reciclado permitiendo determinar un valor aproximado de la temperatura de fusión y transición vítrea del PLA/PLA-R de 90/10, con valores de 204,37 °C y 59,99 °C respectivamente.
- En el proceso de prototipado se observó que la reología de la mezcla PLA/PLA-R de 90/10 resulto afectada, probablemente debido al acortamiento de las cadenas poliméricas, que se presenta en los procesos de extrusión y triturado de los diferentes ciclos, alterando la viscosidad y el flujo del material en comparación con el PLA virgen.
- Mediante un estudio técnico, la elaboración y ejecución de un modelo de simulación, se determinó el número de operarios, máquinas y equipos necesarios en la producción del filamento, donde los resultados arrojados por el modelo muestran que la planta debería operar 14,7 horas al día, por este motivo se establecieron dos turnos de 8 horas, con un operario por turno y una máquina de cada tipo en el proceso de recuperación y dos máquinas de cada tipo en el proceso de extrusión.
- Una vez definido el precio de venta del filamento de PLA/PLA-R, mediante el análisis de factibilidad de factibilidad financiera, se obtuvo que el proyecto produciría beneficios económicos con una inversión en activos de \$ 505.082.045 COP, tanto para el FCL y el FCLI con un VPN promedio de \$549.109.593 COP y \$260.544.059 COP respectivamente, además, que representaría un riesgo de obtención de pérdidas económicas del 0,90% para la operación y del 13,6% para el inversionista.
- Desde el punto de vista técnico y financiero, es viable implementar un proceso para la recuperación de los residuos generados por la manufactura aditiva destinados a la producción de un filamento susceptible de ser usado para la impresión 3D.

D. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un ensayo reológico, para determinar las propiedades del material en estado fundido y el estudio de su estructura mediante parámetros viscoelásticos, con la finalidad de controlar de mejor manera el flujo del material en los procesos de extrusión.
- En estudios posteriores, se podría analizar cómo se comportan las mezclas de PLA/PLA-R al añadir diferentes aditivos que puedan mejorar o minimizar la degradación de las propiedades del material.
- Es necesario realizar capacitaciones a los operarios en el manejo de residuos, selección y diferenciación del PLA. Esto debido a que es indispensable evitar la contaminación del material con otras sustancias o polímeros.
- Se sugiere realizar un estudio de mercado a mayor profundidad, esto debido a que, al ser un sector comercial segmentado, la obtención de información para determinar los clientes potenciales del producto, presenta un mayor grado de complejidad. Esto a su vez permitiría obtener una mayor precisión en la estimación de las ventas en el horizonte de evaluación del proyecto.

- Se propone en futuras investigaciones validar las alternativas presentadas en la etapa de analizar, evaluando la posibilidad de diseñar un sistema de producción en base a otros polímeros usados en la manufactura aditiva, como son el ABS y el PET.
- Con el fin de precisar el impacto que podría generar los gastos financieros en la factibilidad financiera del proyecto y las repercusiones en el FCL y FCLI, se sugiere establecer los gastos de administración y ventas.

VII.GLOSARIO

DANE: Es el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, encargado de Planear, implementar y evaluar procesos rigurosos de producción y comunicación de información estadística a nivel nacional [15].

Maleabilidad: Capacidad de un material para cambiar de forma sin romperse [42].

Desecho: Aquello que queda después de haber escogido, utilizado o procesado algo [42].

Filamento: Que tiene forma o apariencia de hilo, rígido o flexible [42].

Economía lineal: Concepto económico según el cual se desarrollan etapas sucesivas de extracción, procesamiento, utilización y eliminación de productos y materiales, que no es sostenible de modo indefinido [43].

Sostenibilidad: “Es el desarrollo que satisface las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades” [44].

Manufactura aditiva: “(AM-Additive Manufacturing, por sus siglas en inglés), es un proceso de fabricación de componentes tridimensionales, mediante la adición sucesiva de material en varias capas, hasta formar un producto final” [45].

Economía circular: Concepto económico que tiene como objetivo la reducción de residuos manteniendo el mayor tiempo posible el valor de los productos, materiales y recursos [46].

PLA: Es un termoplástico biodegradable y compostable derivado de fuentes vegetales renovables, como almidón y azúcar [47].

Diagrama de Pareto: Es una Herramienta gráfica para clasificar aspectos en orden de mayor a menor frecuencia, para organizar datos de forma que estos queden en orden descendente, de izquierda a derecha y separados por barras [48].

Polímero: Los Materiales poliméricos están basados en grandes moléculas con enlaces covalentes y formados por la unión de muchas unidades simples (monómero). Sus antecesores se pueden considerar que son las macromoléculas presentes en organismos, y se pueden enumerar ejemplos como el caucho, lana, algodón... [49].

DOFA: Es acrónimo de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas, es una herramienta para entender y tomar decisiones en toda clase negocios y empresas [50].

Galga: “Instrumento de precisión para medir ángulos y longitudes muy pequeñas” [51].

Extrusión: Impeler con una bomba un material fundido para producir, a través de una matriz adecuada, barras, tubos, varillas y distintas secciones perfiladas [51]

VoC: se entiende como cualquier contenido que el cliente o la parte interesada, ha escrito o dado como retroalimentación en forma estructurada y principalmente de forma textual [52].

SIPOC: metodología la cual permite visualizar un proceso de manera sencilla, identificando así las actividades que se ejecutan desde que inicia hasta que el producto final llega al cliente [53].

Warping: término usado en impresión 3D para referirse a cuando la primera capa de una pieza se deforma y despega de la superficie de impresión [54].

PESTEL: mide el mercado y el potencial de una empresa según los factores externos, específicamente políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales [50].

VIII.REFERENCIAS

- [1] F. Actions and S. Reports, “PLASTICS RECYCLING WORLDWIDE : CURRENT OVERVIEW AND DESIRABLE,” no. 19, 2019.
- [2] J. N. Hahladakis and E. Iacovidou, “Science of the Total Environment Closing the loop on plastic packaging materials : What is quality and how does it affect their circularity ?,” *Sci. Total Environ.*, vol. 630, pp. 1394–1400, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.330.
- [3] A. M. Akil, J. Foziah, and C. S. Ho, “The Effects of Socio-Economic Influences on Households Recycling Behaviour In Iskandar Malaysia,” vol. 202, no. December 2014, pp. 124–134, 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.08.215.
- [4] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, “Boletín Técnico Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – residuos sólidos,” p. 19, 2020.
- [5] E. M. Foundation, “Towards the Circular Economy : Accelerating the scale-up across global supply chains,” no. January, 2014.
- [6] C. Four, *Circular economy in action : case studies about the transition from the linear economy in the chemical , mining , textile , agriculture , and water treatment industries.* 2019.
- [7] L. Gilpin, “3D printing: 10 companies using it in ground-breaking ways,” *Hardware*, 2014.
- [8] F. A. Cruz, H. Boudaoud, M. Camargo, and J. M. Pearce, “Plastic recycling in additive manufacturing : A systematic literature review and opportunities for the circular economy,” *J. Clean. Prod.*, vol. 264, p. 121602, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121602.
- [9] finance Yahoo, “3D Printing Plastics Market Research Report,” 2020.
- [10] R. Kleer, C. Weller, R. Kleer, and F. T. Piller, “Economic Implications of 3D printing : Market structure Models in light of additive manufacturing Revisited Int . J . Production Economics Economic implications of 3D printing : Market structure models in light of additive manufacturing revisited,” *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 164, no. May 2018, pp. 43–56, 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.02.020.
- [11] R. Molina, G. Pender, L. Moro, and M. T. Piovan, “Comportamiento al creep de un polímero utilizado para impresión 3D,” *Matéria (Rio Janeiro)*, vol. 23, no. 2, 2018, doi: 10.1590/s1517-707620180002.0412.
- [12] R. Molina, G. Pender, L. Moro, and M. T. Piovan, “Comportamiento al creep de un polímero utilizado para impresión 3D,” *Matéria (Rio Janeiro)*, vol. 23, no. 2, 2018, doi: 10.1590/s1517-707620180002.0412.
- [13] ICDE, «gov.co,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.icde.org.co/sectores/ambiental/minambiente>. [Último acceso: 2020].
- [14] Minciencias, «gov.co,» 2020. [En línea]. Available: <https://minciencias.gov.co/ministerio/funciones>. [Último acceso: 2020].
- [15] DANE, «Generalidades,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/acerca-del-dane/informacion-institucional/generalidades>. [Último acceso: 2020].
- [16] Acoplásticos, «Acoplásticos,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.acoplásticos.org/index.php/mnu-nos/mnu-nos-nta-aso>. [Último acceso: 2020].
- [17] R. Gil, «ANÁLISIS DE PROYECTORES,» Enero 2018. [En línea]. Available: <https://comprarproyector.es/tipos-filamentos-impresora-3d-materiales/>. [Último acceso: Octubre 2020].

- [18] sculpteo, «sculpteo.com,» 2020. [En línea]. Available: https://info.sculpteo.com/hubfs/downloads/The%20State%20of%203D%20Printing_2020%20edition.pdf. [Último acceso: Octubre 2020].
- [19] Raj, M. M., Patel, H. V, Raj, L. M., & Patel, N. K. (2013). Studies on Mechanical Properties of Recycled Polypropylene Blended with Virgin Polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(5), 747–751.
- [20] Osswald, T. A., Aquite, W., Ramírez, D., López, L., Puentes, J., Pérez, C., & García Rodríguez, S. (2012). Retos en la industria de procesamiento de plásticos y compuestos. *DYNA (Colombia)*, 79(175 E), 20–28.
- [21] Rubiano Fernández, L., Silva, P., Antonio, M., Barrera Valero, O., Orozco, W., Quesada, F., Diaz, M., & Gaviria, L. (2013). Manejo de los materiales plásticos reciclados y mejoramiento de sus propiedades. *INGE@ UAN-Tendencias En La Ingeniería*, 1(2), 52–60.
- [22] Ana C. Pinho, Ana M. Amaro, Ana P. Piedade, 3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components, *Waste Management*, Volume 118, 2020, Pages 426-434, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.003>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20305134>)
- [23] F. A. C. S. H. B. M. C. Pavlo Santander, Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach., vol. 154, 2020.
- [24] P. Franciszczak, E. Piesowicz, K. Kalniņš, Manufacturing and properties of r-PETG/PET fibre composite – Novel approach for recycling of PETG plastic scrap into engineering compound for injection moulding, *Composites Part B: Engineering*, Volume 154, 2018, Pages 430-438, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.023>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818312368>)
- [25] Farina, Ilenia & Singh, Narinder & Colangelo, Francesco & Luciano, Raimondo & Bonazzi, & Fraternali,. (2019). High-Performance Nylon-6 Sustainable Filaments for Additive Manufacturing. *Materials*. 12. 3955. 10.3390/ma12233955.
- [26] M. Biron, *A Practical Guide to Plastics Sustainability- 6.Environmental and Engineering Data to Support Eco-Design for Plastics*, M. Biron, Ed., 2020, pp. 209-307.
- [27] A. M., «3Dnatives,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/caracteristicas-tiene-nylon-en-impresion-3d-120320202/#!>. [Último acceso: 2020].
- [28] A. M., «3Dnatives,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/el-plastico-de-policarbonato-en-la-impresion-3d-110220202/#!>. [Último acceso: 2020].
- [29] ASTM-D638-14, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,” *ASTM Stand.*, pp. 1–15, 2014.
- [30] ASTM INTERNATIONAL, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–12, 2002.
- [31] ASTM D792, “ASTM D792 - 07: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics,” *Am. Soc. Test. Mater.*, vol. 14, pp. 1–5, 2007.
- [32] W. S. D. Marinho, C. B. B. Luna, E. M. Araújo, C. H. de A. Lustosa, C. R. Bezerra Filho, and R. N. C. Duarte, “From disposal to sustainable development: technological potential of poly(lactic acid) (PLA) blends with 3D filament waste,” *Res. Soc. Dev.*, vol. 9, no. 12, 2020, doi: 10.33448/rsd-v9i12.10767.
- [33] Axioma, «TECNOLOGIA DEL PLÁSTICO,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.plastico.com/producto-descripcion/molino-viper-para-plastico-reciclableserie-8+Showroom3043653164827>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [34] MercadoLibre Colombia LTDA, «Mercado libre,» 2021. [En línea]. Available: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-452238884-bascula-balanza-plataforma-de-piso-150-kg-3040-cm-azul->

_JM?searchVariation=51766653272#searchVariation=51766653272&position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=060d2d7a-32b2-4157-9afb-2e8b590004f7. [Último acceso: Mayo 2021].

- [35] «Alibaba.com,» 2021. [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/50kg-stainless-steel-vertical-plastic-raw-material-particle-color-powder-plastic-mixer-1600218124880.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.3da076c1oFBdf0&s=p. [Último acceso: Mayo 2021].
- [36] «Print3d Colombia,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.print3dcolombia.com/fabricacion-de-filamento/63-filabot-ex6-filament-extruder.html>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [37] «Print3d Colombia,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.print3dcolombia.com/fabricacion-de-filamento/64-filabot-airpath.html>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [38] «Print3d Colombia,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.print3dcolombia.com/fabricacion-de-filamento/65-filabot-spooler.html>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [39] D. LTD., «CompuTrabajo,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.computrabajo.com.co/salarios/operarioa?p=4>. [Último acceso: 05 2021].
- [40] D. LTD., «CompuTrabajo,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.computrabajo.com.co/salarios/supervisora-de-produccion>. [Último acceso: 05 2021].
- [41] Banco de la Republica, "Inflación total y meta en Colombia año 2020," [Online]. [Accessed Junio 2021].
- [42] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, «Diccionario de la lengua española,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/contenido/cita>. [Último acceso: 2020].
- [43] M. Espaliat, *Economía circular y sostenibilidad*. 2017.
- [44] J. A. Plasencia Soler, F. Marrero Delgado, A. M. Bajo Sanjuán, and M. Nicado García, "Modelos para evaluar la sostenibilidad de las organizaciones," *Estud. Gerenciales*, 2018, doi: 10.18046/j.estger.2018.146.2662.
- [45] J. C. Javier Cervantes *et al.*, "Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva (AM) de metal y determinación de propiedades de las piezas obtenidas," *MEMORIAS DEL XXIV Congr. Int. Anu. LA SOMIM*, pp. 20–27, 2018.
- [46] Foundation Ellen MacArthur, "Economía Circular | economiecircular.org," *Economía Circular*, 2017. .
- [47] L. T. Lim, R. Auras, and M. Rubino, "Processing technologies for poly(lactic acid)," *Progress in Polymer Science (Oxford)*. 2008, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004.
- [48] Gehísy, *Diagrama de Pareto - Calidad y ADR*. 2017.
- [49] M. Beltrán Rico and A. Marcilla Gomis, "Estructura y aplicaciones de los polímeros," *Tecnol. polímeros procesado y propiedades*, pp. 1–12, 2005.
- [50] A. Chapman, "Análisis DOFA y análisis PEST," www.eduardoleyton.com, 2004.
- [51] OXFORD, «Oxford lexico,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.lexico.com/es/definicion>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [52] Šperková, L. (2019). Qualitative Research on Use of Voice of Customer in Czech Organisations. *Journal of Systems Integration*, 10(2), 9–18. <https://doi.org/10.20470/jsi.v10i2.372>
- [53] Simon, K. (2019). SIPOC Diagram | iSixSigma. ISixSigma.
- [54] Baumann, F., & Roller, D. (2016). Vision based error detection for 3D printing processes. *MATEC Web of Conferences*, 59, 3–9. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165906003>

- [55] A. Sáez y J. A. Urdaneta G., «Manejo de residuos sólidos en América Latina,» *Revista Omnia*, vol. 20, n° 3, 2014.
- [56] Minambiente, [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/ministerio/mision-y-vision>. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [57] Minciencias, [En línea]. Available: <https://minciencias.gov.co/ministerio/sobre-minciencias>. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [58] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Minambiente,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/130-notas-de-interes/4268-colombia-impulsa-la-primera-resolucion-de-economia-circular-global>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [59] LOGÍSTICA PROFESIONAL, «Logística Profesional.com,» Noviembre 2019. [En línea]. Available: <http://www.logisticaprofesional.com/texto-diario/mostrar/1822517/colombia-muestra-interes-importar-tecnologia-impresion-3d>. [Último acceso: octubre 2020].
- [60] C. I. P. Martínez, «Portafolio,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.portafolio.co/economia/los-retos-en-ciencia-y-tecnologia-para-colombia-despues-del-ingreso-a-la-ocde-518437>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [61] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, «MinTic,» Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Micrositios/Beneficios-Tributarios-para-el-sector-TI/Excluidos-de-IVA/>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [62] Portafolio, «Portafolio,» Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.portafolio.co/negocios/el-impacto-de-la-tecnologia-en-el-desarrollo-de-la-economia-naranja-524481>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [63] J. A. Ocampo, «Portafolio,» Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.portafolio.co/opinion/otros-columnistas-1/el-atraso-colombiano-en-ciencia-y-tecnologia-519977>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [64] Pulso Social, «Pulso social,» Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://pulsosocial.com/2015/02/02/el-impacto-etico-politico-y-social-de-la-impresion-3d/>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [65] M. R. Duarte, «America latina en movimiento,» Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.alainet.org/es/articulo/200854>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [66] R. Dinero, «Camara de comercio de Bogotá,» Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2018/Agosto-2018/La-impresion-3D-se-abre-mercado-con-fuerza-en-Colombia>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [67] J. López Parada, “Fabricación aditiva y transformación logística: la impresión 3D,» *Oikonomics*, no. 9, 2019, doi: 10.7238/o.n9.1805.
- [68] L. Gómez Reyes, “ANÁLISIS DOCUMENTAL DE LOS INCONVENIENTES DE LA IMPRESIÓN 3D,» *3C Tecnol. innovación Apl. a la pyme*, vol. 6, no. 3, 2017, doi: 10.17993/3ctecno.2017.v6n3e23.48-53.
- [69] L. G. Reyes, «Análisis documental de las ventajas de la impresión 3D,» *Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática*, vol. 6, n° 11, Junio 2017.
- [70] I. CORTÉS, «El país,» agosto 2019. [En línea]. Available: https://elpais.com/economia/2019/08/09/actualidad/1565350591_001399.html.
- [71] M. & C. C. Sandra Rincón Consultora Clarke, «Ámbito Jurídico,» Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.ambitojuridico.com/noticias/constitucional-y-derechos-humanos/impresion-3d-la-revolucion-de-las-fabricas>. [Último acceso: Octubre 2020].

- [72] «Ultimaker,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.ultimaker.3dsolutions.com.co/filamentos>. [Último acceso: 2020].
- [73] «PRINT3D COLOMBIA,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.print3dcolombia.com/>. [Último acceso: 2020].
- [74] «UNIVERSO 3D,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.u3d.com.co/>. [Último acceso: 2020].
- [75] «makeR,» 2020. [En línea]. Available: <https://somosmaker.com/>. [Último acceso: 2020].
- [76] «3DBOTS,» 2020. [En línea]. Available: <https://3dbots.co/>. [Último acceso: 2020].
- [77] «Seizo.co,» 2020. [En línea]. Available: <https://seizo.co/>. [Último acceso: 2020].
- [78] «ip3D,» 2020. [En línea]. Available: <https://impresoras3dcolombia.co/>. [Último acceso: 2020].
- [79] «Ir matters,» 2020. [En línea]. Available: <https://itmatters3d.com/>. [Último acceso: 2020].
- [80] «Dualtronica,» 2020. [En línea]. Available: <https://dualtronica.com/32-tienda>. [Último acceso: 2020]. https://elpais.com/economia/2019/08/09/actualidad/1565350591_001399.html.
- [81] «MADLABD,» 2020. [En línea]. Available: <https://madlab3d.co/>. [Último acceso: 2020].
- [82] «IMPRESION3D - 3D CENTER,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.3dcen.com>. [Último acceso: 2020].
- [83] «DIDACTICAS ELECTRONICAS,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com>. [Último acceso: 2020].
- [84] «4Dlab,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.facebook.com/4dlabcolombia/>. [Último acceso: 2020].
- [85] «Zuluprints,» 2020. [En línea]. Available: <https://zuluprints.co>. [Último acceso: 2020].
- [86] «soin3d,» 2020. [En línea]. Available: <https://soin3d.wixsite.com/soin3d>. [Último acceso: 2020].
- [87] «abka 3D,» 2020. [En línea]. Available: <https://abka3d.co/>. [Último acceso: 2020].

IX.ANEXOS

TABLA XXVII.
TABLA DE ANEXOS

| No. Anexo | Nombre | Desarrollo (propio o terceros) | Tipo de Archivo (PDF, HTLM, Excel, Word...) |
|-----------|---|--------------------------------|---|
| 1 | Anexo1 – 2020205 – Información requerimientos | Propio | Word |
| 2 | Anexo2 – 2020205 – Entrevista dueño de empresa productora de filamento | Propio | Word |
| 3 | Anexo3 – 2020205 – Resumen de indicadores ambientales y técnicos de polímeros | Propio | Word |
| 4 | Anexo4 – 2020205 – Plan de recolección de datos | Propio | Excel |
| 5 | Anexo5 – 2020205 – Entrevista usuarios de impresión 3D | Propio | Word |
| 6 | Anexo6 – 2020205 – Análisis PESTEL a industria de impresión 3D | Propio | Word |

| | | | |
|----|---|--------|-------|
| 7 | Anexo7 – 2020205 – Revisión de literatura | Propio | Word |
| 8 | Anexo8 – 2020205 – Empresas distribuidoras de filamento para impresión 3D en Colombia | Propio | Excel |
| 9 | Anexo9 – 2020205 – Matriz AHP | Propio | Excel |
| 10 | Anexo10 – 2020205 – Plan de trabajo elaborado en Project® | Propio | Excel |
| 11 | Anexo11 – 2020205 – Propiedades físico-mecánicas | Propio | Excel |
| 12 | Anexo12 – 2020205 – Propiedades térmicas del material | Propio | Word |
| 13 | Anexo13 – 2020205 – Estudio técnico para la producción de filamento | Propio | Excel |
| 14 | | Propio | |
| 15 | Anexo15 – 2020205 – Desarrollo distribución de planta | Propio | Excel |
| 16 | Anexo16 – 2020205 – Modelo de simulación de la planta de producción | Propio | SPFX |
| 17 | Anexo17 – 2020205 – Reporte de modelo de simulación de la planta de producción | Propio | PDF |
| 18 | Anexo18 – 2020205 – Análisis de factibilidad financiera del proyecto | Propio | Excel |