

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE PAPEL
ORGÁNICO A BASE DEL PSEUDOTALLO DE *Musa × paradisiaca* (PLATANERA)**

**DAVID ANDRES RAMIREZ MENESES
ANDRES FELIPE MANRIQUE BENAVIDES**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYÁN
2023**

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE PAPEL
ORGÁNICO A BASE DEL PSEUDOTALLO DE *Musa × paradisiaca* (PLATANERA)**

**DAVID ANDRES RAMIREZ MENESES
ANDRES FELIPE MANRIQUE BENAVIDES**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

ASESOR: Ph. D, JAVIER ANDRES MUÑOZ CHAVES

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYÁN
2023**

Agradecimiento

“En primer lugar les agradezco a la vida por darme la posibilidad de cumplir este objetivo, mis abuelos en la tierra y un agradecimiento al cielo, a mis padres por brindarme su apoyo incondicional en mis objetivos personales y académicos. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos. Agradezco muy profundamente a mi tutor por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas para llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, a mi compañero el cual se ha convertido en mi amigo y hermano. Gracias por las horas compartidas y las historias vividas”.

David Andres Ramírez Meneses

Agradecimiento

Primeramente, quiero agradecer al padre יהוה todo poderoso de darme la sabiduría y la salud para cumplir esta meta de vida, por su infinito amor y misericordia que nos muestra todos los días.

A mis padres, Eivar Manrique y Zenaida Benavides por ser los pilares de mi vida, por el amor, consejos y todo lo que me han brindado, gracias por ser lo más grandes ejemplos de perseverancia, humildad y honrades, espero que este logro sea de orgullo para ustedes como ustedes lo son para mí, no es nada en comparación con lo que han hecho, y espero tener vida con la ayuda de nuestro señor para devolver a si sea un poco de todo el sacrificio que han hecho por nuestra familia. Sin su apoyo no podría haber culminado esta etapa.

A mis hermanos David y Eider, por el apoyo incondicional en todo momento y cuando más lo necesito, sin duda son una gran inspiración, y ojalá este logro sea de orgullo y ejemplo para ustedes como ustedes lo son para mí.

A la institución Unicomfacauca, el SENA y a mi tutor Ph. D Javier Muñoz, por sus conocimientos, paciencia y constancia durante este proceso, sin su ayuda no hubiera sido nada fácil poder culminar este gran paso.

Finalmente, a mi compañero Ingeniero David Ramírez, mis amigos y demás familiares, cada uno de ustedes es fundamental en el transcurso de mi vida académica y cotidiana, haciendo de mis días, más llevaderos y tolerables.

Andres Felipe Manrique Benavides

Tabla de Contenido

INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE ECUACIONES	XII
Resumen	XIII
Abstract.....	XIV
Introducción	XV
Planteamiento, descripción y formulación del problema.....	XVI
Justificación	XIX
Objetivos.....	XX
CAPÍTULO I – MARCO TEÓRICO	1
1.1. Morfología del plátano	1
1.2. Fibras vegetales y principales compuestos.	3
1.2.1. Celulosa.	3
1.2.2. Hemicelulosa.....	4
1.2.3 Lignina.....	5
1.3. Industria del papel: Proceso, consecuencias y nuevas alternativas.	7
1.4. Aprovechamiento de residuos agroindustriales	9
1.4.1 Hidrólisis alcalina.....	10
1.4.2. Hidrólisis con ácido concentrado y con ácido diluido.	10
1.5. Sistemas para el procesamiento de papel orgánico	11
1.5.1. Bioreactor	11
1.5.1.1. Funciones principales de un reactor	12
1.5.1.2. Clasificación de los reactores.....	12
1.5.1.3. Tipos de proceso en biorreactores	13
1.5.2. Tipos de Reactores.....	14
1.5.2.1 Reactor CSTR.....	14
1.5.2.2. Reactor Tubular	15
1.5.2.3. Reactor BATCH	15
1.5.2.4. Ecuaciones de diseño	16
1.5.2.5 Agitación	18
1.5.2.6. Tipos de Agitación.....	18
1.5.2.7. Diseño de agitadores	19
1.5.3. Compactador	20

1.5.3.1. Moldes estándar.....	20
1.5.3.2. Moldes positivos.....	20
1.5.3.3. Moldes semi positivos	21
CAPÍTULO II – Materiales y métodos	22
2.1 Síntesis y procesamiento de papel orgánico a base del pseudotallo de <i>Musa × paradisiaca</i>	22
2.1.1. Adecuación de la materia prima.....	23
2.1.1.1. Extracción y Lavado de fibras	23
2.1.1.1. Secado en horno.....	24
2.1.2. Procesamiento de las fibras para extracción de celulosa.....	24
2.1.3. Caracterización de las muestras.....	25
2.1.3.1. Microscopía electrónica de barrido.....	26
2.1.3.2. Calorimetría diferencial de barrido.....	26
2.1.3.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.....	26
2.1.3.4. Termogravimetría.....	26
2.1.4. Conformado del papel orgánico	26
2.2 Diseño del prototipo para el procesamiento de papel orgánico con base en el pseudotallo del plátano.	27
CAPÍTULO III – Resultados y discusión.....	28
3.1. Síntesis y procesamiento de celulosa	28
3.1.1. Tratamiento de las fibras de pseudotallo	30
3.1.2. Procesos de hidrólisis de las fibras de pseudotallo del plátano.....	31
3.1.2.1. Hidrólisis alcalina	31
3.1.2.2. Caracterización morfológica, estructural y térmica de la hidrólisis alcalina	33
3.1.2.3. Hidrólisis ácida.....	39
3.1.2.4. Caracterización morfológica, estructural y térmica de la hidrólisis ácida.....	42
3.1.3. Compactación de muestras obtenidas.....	45
3.1.4. Procesamiento de muestras para obtención de papel.	46
3.2. Diseño del biorreactor y sistema de compactación.....	47
3.2.1. Dibujo a mano alzada.....	47
3.2.2. Diseño CAD de los sistemas	48
3.2.2.1. Diseño del Biorreactor Batch.....	48
3.2.2.2. Compactador Neumático.....	58
3.2.3. Descripción del proceso y uso del compactador neumático.....	65
3.2.4. Presupuesto	66
3.2.5. Validación del papel sintetizado como filtro de agua.....	66

CAPÍTULO IV – Conclusiones	70
CAPITULO V – Recomendaciones y Trabajos Futuros	71
Referencias.....	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología de la planta de plátano	2
Figura 2. Estructura de una fibra vegetal.....	3
Figura 3. Estructura química de la celulosa.....	4
Figura 4. Estructura química de la hemicelulosa	5
Figura 5. Estructura química de la lignina	6
Figura 6. Elaboración de papel por proceso Kraft	7
Figura 7. Características y aplicaciones de un Biorreactor	11
Figura 8. Biorreactor de Vidrio TECHNICAL	12
Figura 9. Tipos de reactores ideales: (a) Reactor discontinuo, (b) Reactor de flujo en pistón, (c) Reactor de mezcla completa.....	13
Figura 10. Tipos de procesos.....	14
Figura 11. Reactor CSTR. [77].....	15
Figura 12. Reactor tipo flujo pistón (PFR). [76].....	15
Figura 13. Reactor tipo Batch. [74].....	15
Figura 14. Balance de masa. [79].....	16
Figura 15. Balance de masa Reactor Batch.[79]	17
Figura 16. Balance de masa Reactor discontinuo ideal tipo Batch.[79]	17
Figura 17. Patrones de flujo. (a) Flujo axial. (b) Flujo Radial. [80]	18
Figura 18. Mezcladores para líquidos de viscosidad moderada: a) agitador marino de tres palas; b) turbina simple de pala recta; c) turbina de disco; d) agitador de pala cóncava; e) turbina de pala inclinada [83].	18
Figura 19. Tipos de moldes. (a) Simple, (b) Positivo y (c) semi positivo.	21
Figura 20. Ruta de aprovechamiento del pseudotallo de plátano y banano.....	22
Figura 21. Adecuación de la materia prima mostrando el pseudotallo del plátano obtenido.	23
Figura 22. Adecuación de la materia prima mostrando el pseudotallo del plátano obtenido.	23
Figura 23. Fibra de Pseudotallo seca.....	24
Figura 24. Metodología para el procesamiento de fibras.....	24
Figura 25. Equipos de laboratorio usados (a) Balanza marca Adam, (b) Bioreactor- Walter Velazco 10L, (c) Horno tipo mufla - VWR 115 L, (d) Plancha térmica con agitación magnética - Dlab, (e) Multiparámetro (PH) - Sper Scientific y (f) Bomba de vacío - GAST..	25
Figura 26. Troquel de compactación.	26
Figura 27. Metodología de Diseño mecatrónico.	27
Figura 28. Imagen de MEB de una fibra del pseudotallo de plátano sin tratamiento.	28
Figura 29. Calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la muestra sin tratamiento.	28
Figura 30. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para la muestra sin tratamiento.	29
Figura 31. Tratamiento de las fibras de pseudotallo en el biorreactor.	30
Figura 32. Lavado de las fibras, evidenciando la disminución de lignina por la coloración del agua residual.	31
Figura 33. Proceso de filtrado del material de estudio.....	31
Figura 34. Hidrólisis alcalina en NaOH al 5%.....	32
Figura 35. Hidrólisis alcalina con H ₂ O ₂ al 10%.....	32
Figura 36. Hidrólisis alcalina en NaOH al 5%.....	33
Figura 37. Hidrólisis alcalina en NaOH al 5% + H ₂ O ₂ al 10%.	33

Figura 38. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis con hidróxido de sodio (5%) .	34
Figura 39. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis con peróxido de hidrógeno (10%).	34
Figura 40. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis en hidróxido de sodio (NaOH 5%).	34
Figura 41. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis con una combinación de peróxido de hidrógeno e hidróxido de sodio (proporción 2:1).	35
Figura 42. Termograma DSC de las muestras tratadas con (A) Hidróxido de Sodio (NaOH) y (B) Peroxido de Hidrogeno (H_2O_2), (C) Hidróxido de Sodio y Peróxido de Hidrógeno	35
Figura 43. TGA de la muestra tratada con NaOH al 5 %.	36
Figura 44. TGA de la muestra tratada con H_2O_2 al 10%.	37
Figura 45. TGA de la muestra tratada con H_2O_2 -NaOH en una proporción 2:1.	37
Figura 46. Espectros de FTIR de las muestras tratadas con hidrólisis alcalina.	39
Figura 47. Fibra de pseudotallo, lavada en agua destilada y tratamiento alcalino con pH neutro y secado en horno tipo mufla.	40
Figura 48. Hidrólisis Ácida con ácido clorhídrico (2.5 M).	40
Figura 49. Agitación en Ácido Nítrico (2.5 M).	41
Figura 50. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Nítrico proporción 1 a 2.	41
Figura 51. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Nítrico proporción 2 a 1.	41
Figura 52. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Sulfúrico proporción 2 a 1.	42
Figura 53. Micrografías de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis ácida con (a) HCl, (b) HNO_3 , (c) HCl + HNO_3 (1:2), (d) HCl + HNO_3 (2:1) y (e) HCl + H_2SO_4 (2:1).	42
Figura 54. Muestras DSC de los procesos ácidos.	43
Figura 55. Muestra FTIR para los procesos con hidrólisis ácida.	44
Figura 56. Proceso de compactación de material.	45
Figura 57. Mejores resultados de compactación.	46
Figura 58. intentos de elaboración de hojas de papel.	46
Figura 59. Bosquejo del biorreactor	48
Figura 60. Bosquejo de compactador.	48
Figura 61. Dimensión de cilindro. [73]	49
Figura 62. Dimensiones del biorreactor y vista renderizada en software CAD.	50
Figura 63. Medidas de un agitador tipo turbina. [83]	51
Figura 64. Turbina tipo Rushton con seis palas montadas sobre un disco. [77]	52
Figura 65. Diseño de la turbina tipo Rushton con las medidas calculadas.	54
Figura 66. Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia.[83]	57
Figura 67. Base para tamiz.	58
Figura 68. Cilindro neumático doble efecto.	58
Figura 69. Base inferior y superior del prototipo.	59
Figura 70. Resistencia de calor tipo tira mica.	59
Figura 71. Estudio de distribución de calor placa A.	60
Figura 72. Estudio de distribución de calor placa A con dos resistencias de calor.	60
Figura 73. Base de compactador neumático.	60
Figura 74. Ensamble del sistema compactador neumático.	61
Figura 75. Compactador neumático.	61

Figura 76. Renderización de compactador.....	61
Figura 77. Circuito de control neumático.....	62
Figura 78. Circuito controlador neumático.....	63
Figura 79. Circuito controlador de compactador.....	63
Figura 80. Algoritmo en C + + para compactador.....	64
Figura 81. Simulación de circuito	64
Figura 82. Procesamiento de fibras de pseudotallo para compactación de papel orgánico.	65
Figura 83. Diseño de la porta filtro.	67
Figura 84. Proceso de filtración para validación del papel sintetizado.....	67
Figura 85. resultados de filtración.	67
Figura 86. Retención de partículas de arcilla; (A) Filtro sin usar del tratamiento ácido HCl y H ₂ SO ₄ , (B) Filtro sin usar del tratamiento ácido con HCl y HNO ₃ s, (C) y (D) Medición de partículas retenidas en cada material.....	68

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Área y producción de plátano en Colombia.	XVII
Tabla II. Porcentajes de celulosa en la materia prima.	1
Tabla III. Fuentes, métodos de extracción y aplicaciones de la celulosa.	10
Tabla IV. Ventajas y desventajas de un reactor tipo batch	16
Tabla V. Tipos de mezcladores.....	19
Tabla VI. Materiales de laboratorio.....	25
Tabla VII. Reactivos	25
Tabla VIII. Asignación de bandas del espectro FTIR.....	29
Tabla IX. Asignación de picos térmicos y porcentajes de masa.	38
Tabla X. Parámetros geométricos del agitador de turbina tipo Batch.	54
Tabla XI. Densidad de los reactivos (NaOH-H ₂ O ₂ -HCL-NH ₄ NO ₃ -H ₂ SO ₄).....	55
Tabla XII. Presupuesto de materiales para construcción del biorreactor y el sistema de compactación.....	66
Tabla XIII. Variables medidas en la filtración.....	68

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Velocidad de reacción.....	17
Ecuación 2. Transferencia de calor de un reactor	20
Ecuación 3. Volumen de un cilindro de un reactor	49
Ecuación 4. Número de Re	55
Ecuación 5. Número de Potencia	56

Resumen

De forma general, la agroindustria es considerada una actividad de vital importancia para el desarrollo y sostenibilidad del ser humano. Sin embargo, muchos de los recursos naturales de esta industria, generan una serie de residuos que son desaprovechados y pueden llegar a causar emergencias de tipo ambiental, si no se realiza una adecuada disposición. En particular, la fibra del pseudotallo de plátano (*Musa × paradisiaca*) es un residuo que post cosecha que se usa como abono o simplemente se desecha. Este, al ser una fibra vegetal, se caracteriza por tener componentes lignocelulósicos, que pueden extraerse con el fin de obtener productos de valor agregado. Por otro lado, la industria papelera, la cual su materia prima se basa en la obtención de celulosa para generar cantidades de productos derivados de este material, tienen como principal fuente de recolección plantaciones de árboles como pino y eucalipto; dicha recolección afecta tanto el suelo donde están ubicados estos árboles, como el ecosistema que lo acompaña, tal es el caso de afluentes cercanos y animales silvestres. Además, los procesos de producción que se llevan a cabo en las industrias generan un impacto al medio ambiente. En este sentido, el objetivo de este estudio fue obtener fibra y celulosa micrométrica a partir del pseudotallo de *Musa × paradisiaca* (plátano), tomando como guía algunos estudios realizados por otros autores. Así, se realizó un procedimiento propio optando por un proceso con condiciones que benefician al sector agroindustrial, al sector papelerero y ayudar a enfrentar y prevenir el cambio climático. La metodología empleada para la obtención de celulosa incluyó técnicas como hidrólisis alcalina y ácida, con cloruro de sodio, peróxido de hidrógeno, ácido clorhídrico y ácido nítrico, entre otros. La caracterización física y química del residuo y sus subprocesos, demostró que el procedimiento de obtención aislamiento de fibras de celulosa es técnicamente adecuado y eficaz. Se realizan análisis físicos químicos de la materia prima y producto terminado de los cuales se concluye con un material no soluble al agua y blanquecino característico de la celulosa microcristalina. Se emplea una metodología de diseño mecatrónico centrada en la contextualización del diseño y funcionamiento, de un prototipo para el aprovechamiento de este residuo. Así, el prototipo planteado permite el control del proceso de hidrólisis y compactación de papel usando software CAD (Solid Works). El diseño electrónico se simuló en Proteus y Festo siendo adecuado para el proceso de compactación. Finalmente, se toman muestras del material y son sometidas a compactación para evaluar la capacidad mecánica del material para ser transformado y ser utilizado en la producción de papel orgánico, así como la posibilidad para ser usado filtro de agua contaminadas.

Palabras clave: Prototipo, Pseudotallo de plátano, *Musa × Paradisiaca*, celulosa, papel orgánico, hidrólisis, diseño electrónico, neumática.

Abstract

Agroindustry is generally considered an activity of vital importance for human development and sustainability. However, many of the natural resources of this industry generate a series of wastes that are wasted and can cause environmental emergencies if they are not properly disposed of. In particular, banana (*Musa × paradisiaca*) pseudostem fiber is a post-harvest waste that is used as fertilizer or simply discarded. As a vegetable fiber, it is characterized by its lignocellulosic components, which can be extracted to obtain value-added products. On the other hand, the paper industry, whose raw material is based on obtaining cellulose to generate quantities of products derived from this material, has as its main source of collection tree plantations such as pine and eucalyptus; this collection affects both the soil where these trees are located and the accompanying ecosystem, such as nearby tributaries and wild animals. In addition, the production processes carried out in the industries generate an impact on the environment. In this sense, the objective of this study was to obtain micrometer fiber and cellulose from the pseudostem of *Musa × paradisiaca* (plantain), taking as a guide some studies carried out by other authors. Thus, a proprietary procedure was developed, opting for a process with conditions that benefit the agroindustrial sector, the paper sector and help to confront and prevent climate change. The methodology used to obtain cellulose included techniques such as alkaline and acid hydrolysis, with sodium chloride, hydrogen peroxide, hydrochloric acid and nitric acid, among others. The physical and chemical characterization of the residue and its sub-processes showed that the procedure for obtaining cellulose fiber isolation is technically adequate and effective. Physical and chemical analyses of the raw material and finished product were carried out and concluded with a non-water-soluble and whitish material, characteristic of microcrystalline cellulose. A mechatronic design methodology focused on the contextualization of the design and operation of a prototype for the use of this waste is used. Thus, the proposed prototype allows the control of the paper hydrolysis and compaction process using CAD software (Solid Works). The electronic design was simulated in Proteus and Festo being suitable for the compaction process. Finally, samples of the material were taken and subjected to compaction to evaluate the mechanical capacity of the material to be transformed and used in the production of organic paper, as well as the possibility to be used as a filter for contaminated water.

Keywords: Prototype, banana pseudostem, *Musa × Paradisiaca*, cellulose, organic paper, hydrolysis, electronic design, pneumatics.

Introducción

Hoy en día, los procesos de fabricación de papel han evolucionado junto con la industria y la tecnología, por lo cual surgen grandes fábricas para su producción, sin embargo, es importante resaltar que aún se presentan impactos negativos en la industrialización y aprovechamiento de materias primas. La zona andina colombiana, localizada entre los 750 y los 3450 m, se caracteriza por encontrar especies como el roble, cuyas aglomeraciones brindan servicios ecosistémicos [1]. Dentro de estos servicios se destaca la provisión de madera, la protección del recurso hídrico, conservación de suelos, captura de carbono, regulación de los gases de efecto invernadero [2]. Según la Política Nacional de Cambio Climático casi el 50 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero (gei) de Colombia se generan en el sector rural, principalmente por la ganadería y la deforestación; la ganadería con un total de 23,3 Mton de CO₂eq, para un 13 por ciento de las emisiones netas de CO₂ y no tiene absorciones y aunque el grupo de tierras forestales absorbe 30 Mton de CO₂ eq, emite 60,8 millones de toneladas de CO, lo cual implica una emisión neta de 31 Mton de CO₂eq, para una participación del 17% en el total [3]. En este sentido, la industria del papel emplea millones de toneladas anuales de cloro combinado con peróxido de hidrógeno para blanquear la pasta [4]. Por otro lado, se tiene el alto contenido de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales que contienen licor negro, el cual es resultado de la cocción de pulpa, donde su disposición final conlleva a una serie de contaminantes tóxicos (hidróxido de sodio, NaOH y sulfuro de sodio, Na₂S).[5]. Por ello los nuevos lineamientos ambientales procuran innovar de forma que se busca disminuir el impacto negativo sobre el medio ambiente.

En este sentido, replantear el proceso de producción de papel es uno de los puntos clave de investigación a nivel global. Debido a las políticas de cambio climático, los gobiernos y empresas se están obligando a promover un desarrollo sostenible basado en la transformación de recursos renovables y de bajo coste [6]. Aunque la madera sigue siendo la materia prima esencial en la producción de papel, el consumo y las investigaciones en torno a fibras no madereras muestran una tendencia creciente en los últimos años[7]. Así, es claro que los residuos agroindustriales, ampliamente distribuidos, abundantes y biodegradables juegan un papel importante en un futuro sostenible. [8]

De esta forma, el presente proyecto de investigación enfoca su importancia en aprovechar residuos agroindustriales de la región, para obtener un producto con mayor valor agregado, lo que ha futuro podría repercutir en el impulso de una economía circular, un cambio en la matriz productiva, fortalecimiento e innovación de las industrias y agroindustrias nacionales, tal que, se tengan procesos amigables con el medio ambiente. Así, el primer proceso que se lleva a cabo en este estudio es la búsqueda de fibras vegetales las cuales se puedan utilizar en la elaboración de papel, para ello se obtuvo el pseudotallo de la planta de plátano. Disminuir el tamaño del material es un paso fundamental para la obtención de fibras para su posterior manipulación. Así, una vez obtenido el tamaño de la fibra de celulosa se procede a la caracterización estructural, térmica y morfológica del material. Estas características darán paso al conformado de papel orgánico. La segunda parte de la investigación consiste en el diseño de un prototipo de una máquina compactadora papel y diseño de un bioreactor para la obtención de celulosa, los cuales toman las características del proceso de adecuación, caracterización y conformado del material para soportar el diseño. Teniendo en cuenta esto, la organización del documento sigue el siguiente esquema:

- Capítulo 1: Marco teórico.
- Capítulo 2: Materiales y métodos.
- Capítulo 3: Validación y análisis de resultados.
- Capítulo 4: Conclusiones.
- Capítulo 5: Recomendaciones y Trabajos Futuros.

Planteamiento, descripción y formulación del problema

Según la Cámara de la Industria de Pulpa, Papel y Cartón de la ANDI en un informe de sostenibilidad [9], se afirma que el sector papelerero en Colombia aporta el 4,6% del PIB industrial nacional, genera más de 9.000 empleos y exporta a países como Ecuador, Perú y Centroamérica. A nivel mundial, la producción de papel y cartón en Colombia representa el 0,3%, y el 6% en América Latina. Mientras que, en el caso de la pulpa, estas cifras corresponden al 0,1% y al 13%, respectivamente, ya que hay 15 empresas de papel y cartón, pero tan solo 9 de ellas están registradas formalmente. [9].

Así, es claro que el papel es un producto que, debido a la importancia que posee tiene gran demanda en el mercado nacional e internacional. En general las empresas de la industria papelerera, ahora con las nuevas políticas ambientales e innovaciones de la industria están en camino de evolución, mirando más allá de solo la producción de papel, destacándose hoy en día, términos tales como, reciclaje, nuevas alternativas, economía circular, entre otros. Este es el caso de ARAUCO, donde a través de programas de investigación y desarrollos basados en sostenibilidad crearon Bioforest, un centro de excelencia e investigación que busca desarrollar y aplicar tecnología de última generación a través de laboratorios de biotecnología y celulosa, invernaderos y plantas industriales, destacándose la creación de productos como filtros o biopaneles [10]. Esta evolución no sólo ha llevado a esta industria a mejorarse, sino en buscar soluciones a los problemas que causan, tal como, las emisiones de carbono. Es así como BioPappel se adelantó y decidió ser parte de la solución al problema del cambio climático. Producir papel sin cortar árboles, reciclar papel en gran escala, co-generar energía verde aprovechando el vapor de las operaciones industriales, reciclar el agua de los procesos y capturar 8 veces más carbono del emitido [11].

El cuestionamiento sobre la tala y la elección de fibra no arbórea es considerado un foco de investigación a nivel internacional y nacional. Este hecho se da debido a la escasez de suministros convencionales para la producción de pulpa, la tala indiscriminada de bosques y todo el efecto ambiental que trae este proceso. Así, las plantas no madereras y los residuos agrícolas crean un gran interés para su reutilización y aprovechamiento en este sector.

En Colombia la industria del papel y el cartón, así como, la recolección de material para reciclaje que se hace en el país se ubica principalmente en el Valle del Cauca [9], siendo además esta misma región la que ocupa una gran producción de plátano en el país, por el tipo de suelo climático que se da en el cinturón tropical del planeta [12]. En este sentido, se estima que cada año la industria agrícola desecha o quema toneladas de residuos del cultivo de plátano [13]. En muchos países y algunos departamentos colombianos a partir de los residuos del plátano (tallo, hojas, raquis) se obtienen subproductos como abono y comida para animales.

A nivel local, se estimó que para el año 2014 en el departamento del Cauca se sembraron 15.811 hectáreas (Ha) de plátano según el ministerio de agricultura, siendo que, de esta siembra sólo el fruto es comercializado dejando las demás partes vegetativas sin algún tipo de proceso post-cosecha [14].

Si estos desechos se utilizan eficientemente, las familias cultivadoras podrían tener un ingreso económico adicional. A pesar de tener este potencial de aprovechamiento, la realidad de los desechos de plátano es otra, pues alrededor del 95% de los residuos que genera el plátano no son aprovechados, ya que la producción está enfocada en la comercialización de un producto alimenticio. Por tal razón, lo que sobra es usado como abono para la tierra por

medio de la descomposición. La problemática con esto es que los residuos no ayudan a nutrir el suelo, sino por el contrario impactan de forma negativa el medio ambiente, al fomentar el crecimiento de microorganismos donde no deberían crecer. Estos pueden afectar los cultivos, obstruir cañadas, generar hongos inadecuados, entre otros [15].

Actualmente en Colombia es conocido que el papel y el cartón provienen principalmente de tres fuentes sostenibles: la fibra virgen de madera de plantaciones forestales certificadas en manejo responsable (26.7%), la fibra virgen de bagazo de caña de azúcar (12,42%) y la fibra reciclada recolectada de residuos de papel después de su consumo (60,81%). Los ciclos de producción en este sector se basan en un modelo de economía circular donde los residuos se convierten luego en materia prima, en este sentido se estima que este sector consumió 1.513.874 toneladas de fibra en el año 2017 [16]

El cultivo de plátano en Colombia representa cerca del 50% del área sembrada en el país con cerca de 500 mil hectáreas cultivadas, y aunque es un fruto que se da en todo el territorio colombiano, su producción es principalmente para el consumo interno. Según datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural para 2017 el principal productor fue el departamento de Antioquia con un total de 61.000 hectáreas sembradas, seguido por Arauca, Quindío, Córdoba y Valle del Cauca. [17].

Dada la problemática planteada, la utilización de fibra de la planta de plátano y banano como materia prima para la obtención de celulosa y elaboración de papel orgánico, surge como una alternativa con el objetivo de mitigar los efectos ambientales producidos por la fabricación y poca reutilización de papel a partir de recursos maderables, así como también la mala disposición de residuos provenientes de las cosechas de plátano y banano.

Tabla I. Área y producción de plátano en Colombia.

Fuente: Ministerio de agricultura. [14]

DEPARTAMENTOS	ÁREA (Ha)			PRODUCCIÓN (Ton)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Antioquia	57.376	59.382	58.915	414.390	449.685	474.860
Valle del Cauca	28.982	32.195	29.156	260.908	282.693	342.462
Quindío	26.311	26.667	26.188	246.271	249.870	269.482
Arauca	30.145	32.226	29.775	460.089	481.304	584.043
Córdoba	28.377	31.153	29.152	250.122	293.075	304.687
Caldas	21.634	23.848	20.858	244.356	249.647	283.574
Meta	15.009	18.922	18.461	256.197	292.507	350.172
Otros	224.164	219.154	227.789	1.776.653	1.936.697	1.707.446
TOTAL	431.998	443.547	440.294	3.908.986	4.235.478	4.316.726

Así, se plantea que el panorama en la zona sur del Cauca tiene gran área de hectáreas sembradas y producción de plátano, como lo es el departamento Valle del Cauca con un área

sembrada de 29.156 hectáreas (Ha) y una producción de 342.462 Ton para el año 2018, como lo confirma el ministerio de agricultura (Tabla I). Habiendo observado el bajo nivel del aprovechamiento de los residuos de la planta de plátano, surge el siguiente cuestionamiento:

¿Cómo aprovechar los residuos del cultivo de plátano y banano en la elaboración de papel orgánico a través de la obtención de fibras y celulosa?

Justificación

Los residuos industriales corresponden a todo fluido que es parte de un proceso industrial que ya no es utilizado. La composición química de los residuos industriales va a depender directamente de la naturaleza de los materiales empleados en el proceso.

Referente a los desechos agroindustriales, Colombia está generando una gran cantidad de residuos que podrían generar un impacto positivo en el medio ambiente debido a su alto contenido de materia orgánica. Sumado a esto, debido a la gran biodiversidad del país, existe el potencial de generar productos con un valor agregado que permitan generar nuevos ingresos a las personas del sector agrícola [18].

Chiappe Bueno [15] afirma que, en el proceso de cosecha y post cosecha del plátano, se presentan elementos como el pseudotallo, el vástago (donde cuelga la fruta), la cáscara de la fruta, la bellota y las hojas, los cuales son normalmente desechados y dejados para descomposición y abono del suelo, cuando en realidad se podrían obtener hasta 15 subproductos.

La posibilidad de obtener otro subproducto, en este caso fibra y celulosa a partir de los residuos postcosecha (hojas, raquis y tallos) de planta de plátano y banano, es de gran importancia, ya que se daría a conocer una nueva alternativa para el aprovechamiento total de la planta, una mejor disposición de residuos, promoviendo e incentivando nuevas prácticas de consumo y cosecha, que contribuirían a mitigar en parte el problema de la contaminación que genera a escala global la producción de papel mediante el uso de madera.

Por otro lado, dada la versatilidad de la celulosa como materia prima en diversas áreas tales como, medicina (biopolímeros), materiales de alta performance (composites), ambiente (filtros o membranas), optoelectrónica (dispositivos flexibles) [19], la explotación de este residuo podría abrir puertas al desarrollo de nuevos productos de mayor valor agregado, capaz de convertirse en una fuente complementaria de ingreso de los productores.

Con el presente proyecto, a futuro puede generar un lazo de comunicación y desarrollo entre la industria del papel con la agroindustria, generando un aporte en el cuidado ambiental y el desarrollo del campo, el cual es fundamental en la evolución de la sociedad, de igual forma, se pretende aportar una alternativa de innovación al proceso de producción de papel, buscando una ruta y un producto amigable con el medio ambiente.

Objetivos

- **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un prototipo de máquina semiautomática para extracción de celulosa y conformado de papel orgánico a base del pseudotallo de Musa × paradisiaca.

- **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Identificar una ruta con los parámetros adecuados para la obtención de pasta de celulosa a partir del pseudotallo de plátano.

Plantear los componentes estructurales y de control del prototipo de la máquina semiautomática para el conformado de papel orgánico.

Generar la simulación del funcionamiento general a través de software CAD para los sistemas eléctricos, neumáticos y mecánicos.

CAPÍTULO I – MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de entrar en contexto con la temática abordada en esta investigación, a seguir se desarrollan algunos conceptos básicos en relación a los materiales de partida, la industria del papel y el procesamiento de residuos agroindustriales.

1.1. Morfología del plátano

De forma general, los vegetales están constituidos básicamente por Holo celulosa, lignina, resinas, aceites volátiles, ceras, taninos, proteínas, lípidos, ácidos, minerales y agua. La Holo celulosa está constituida por celulosa (40 al 60%) y hemicelulosa (15-35%) la cual es utilizada para fabricar papel. La lignina es rica en carbono y está presente en un 20-25% en los vegetales; las resinas, las ceras y los taninos se hallan en cantidades variables, dependiendo del tipo de material vegetal. El agua generalmente constituye el 20 a 35% de las maderas [20].

Los plátanos, incluidos los bananos, son las frutas más consumidas en el continente sudamericano, con un volumen de producción anual de 24 millones de toneladas. Incluso con un procesamiento mínimo la producción de plátanos genera grandes cantidades de residuos, como pseudotallo, tallo, hoja y piel [21].

A continuación, en la tabla II. se presenta el porcentaje de celulosa promedio en la planta de plátano.

Tabla II. Porcentajes de celulosa en la materia prima.

Fuente: Obtenida de [22]

Muestra	Muestra	Celulosa (%)
Sin tratamiento	Raquis	1.8±2.43
	Pseudotallo	28.5±3.06
	Cáscara	17.9±2.84
Tratamiento de Limpieza y blanqueamiento	Raquis	68.8±2.89
	Pseudotallo	79.0±3.67
	Cáscara	63.6±2.75

La planta del plátano consta de 5 partes principales (raíz, tallo, hojas, flores, fruto) [23], como se muestra en la figura 1.

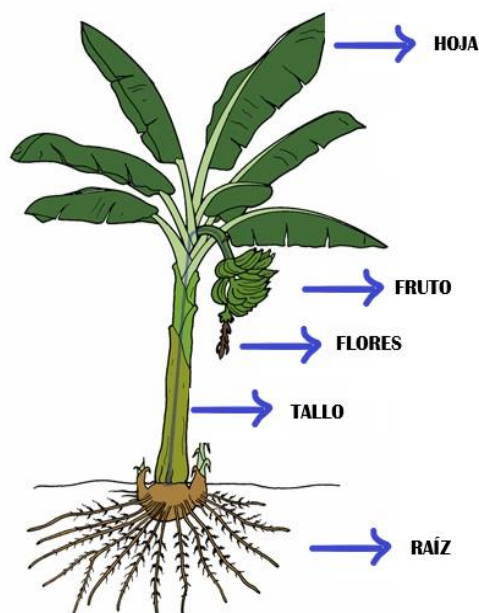


Figura 1. Morfología de la planta de plátano

Fuente: Obtenida de [24]; modificado por autor, 2021.

La raíz (Sistema radicular), se considera del tipo fascículo, característica propia de las plantas monocotiledóneas. Esta planta no posee una raíz principal así la planta tiene un mayor agarre al suelo, siendo que, la longitud de estas raíces fibrosas puede alcanzar una profundidad de 1,5 m y cubrir 5 m de superficie [25].

El tallo verdadero es un rizoma grande, almidonoso, subterráneo, que está coronado con yemas; las cuales se desarrollan cuando la planta ha florecido y fructificado, da origen a las raíces y los peciolos, cuyas vainas o calcetas que formarán el pseudotallo o tallo falso. A medida que cada chupón del rizoma alcanza su madurez, su yema terminal se convierte en una inflorescencia (bacota), que es empujada hacia arriba desde el interior del suelo por el alargamiento del verdadero tallo a través del tallo aparente o falso, hasta que emerge arriba del pseudotallo, que puede alcanzar alturas hasta de 4 metros [26]. Luego estas inflorescencias serán los hijos de los cuales habrá uno seleccionado para reemplazar a la planta madre después de la fructificación y se le llama sucesor [27].

En relación con las hojas, estas están entre las más grandes del reino vegetal con una longitud y ancho en la parte media, que pueden variar de un mínimo de 0.21 x 0.16 m para la primera hoja y un máximo de 2.58 x 0.87 m para las últimas hojas. Aparentan un color verde fuerte o amarillo verdoso dependiendo del estado nutricional de la planta [27].

Es conocido que los frutos pueden tardar entre 80 y 180 días en desarrollarse por completo. En condiciones ideales todas las flores femeninas, dan fruto a los que se denomina "manos" a las hileras en las que se disponen. El punto de corte se fija normalmente en la "falsa mano", punto donde empiezan las flores. [26]

1.2. Fibras vegetales y principales compuestos.

Se denominan fibras vegetales a un extenso conjunto de materiales fibrosos, situados en diferentes partes de las plantas como, fibras del tallo de cáñamo, hojas de sisal, cáscaras de frutas y semillas. La magnitud de cada fibra tiene diferentes variaciones según la planta. En la actualidad se conocen algunas de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las fibras, ya que las empresas madereras las estudian, puesto que son materia prima de las industrias de papelería [28]. Según Tuárez y Correa [29] las fibras se pueden presentar de forma continua (alineadas) y discontinuas (cortas), además los refuerzos lignocelulósicos están constituidos por celulosa, lignina y hemicelulosa, variando según las diferentes especies vegetales [30].

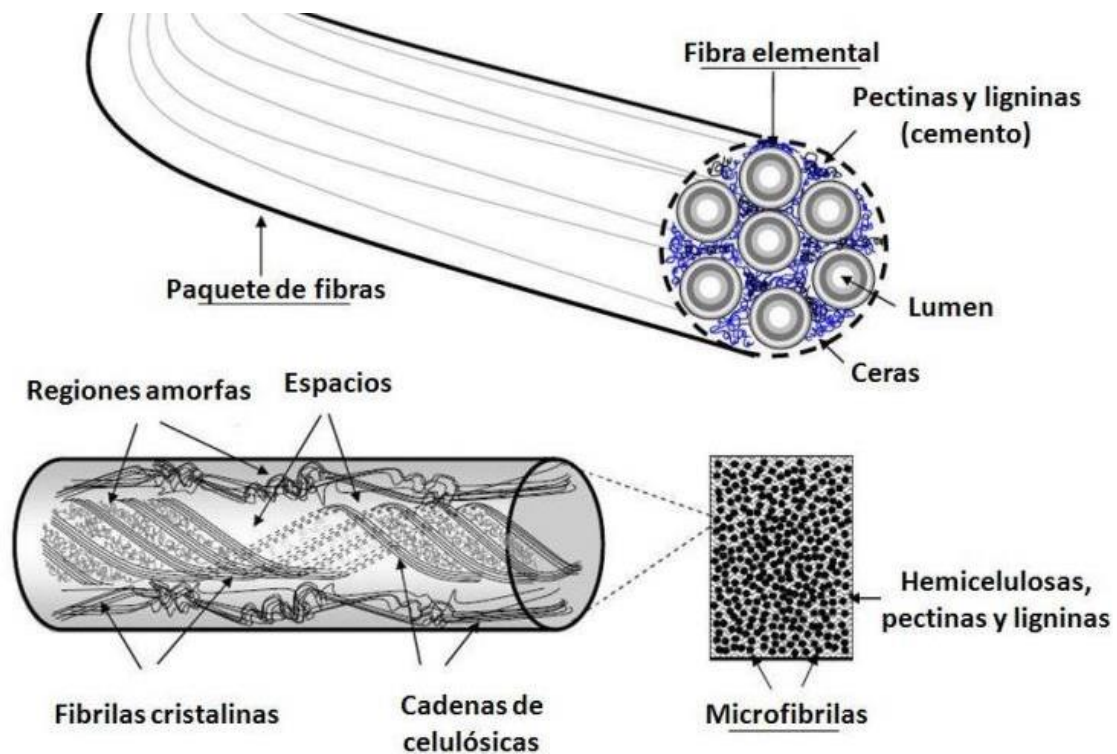


Figura 2. Estructura de una fibra vegetal

Fuente: Obtenida de [31].

En relación a la figura 2, a continuación, se describe puntualmente parte de la estructura de las fibras vegetales.

1.2.1. Celulosa.

Esta biomolécula es un polímero natural que se produce en gran cantidad como producto del proceso bioquímico de la fotosíntesis siendo así, las plantas, son una de las principales fuentes de obtención de celulosa, pero, también ciertos microorganismos son capaces de sintetizarla. Por lo tanto, no es posible encontrarla de forma pura en la naturaleza, pero existen fibras vegetales como el algodón y el cáñamo como claros ejemplos de celulosa prácticamente pura [32].

A nivel estructural (figura 3), la celulosa es un polisacárido lineal conformado por moléculas β -D- glucosa, unidas mediante enlaces β -1,4-glucosídicos lo que le da la característica de ser inmiscible en agua. Además, se encuentra formando una especie de micro fibrillas en la pared celular de los vegetales, estas a su vez en una determinada orientación y en forma de capas van formando fibras elementales. Así, si se tiene que los enlaces de hidrógenos son pocos, la celulosa se considera amorfa, mientras que una disposición especial de estos enlaces se generan diferentes formas cristalinas. La clase β , es fuerte y resistente ante cambios de temperatura resultando como un derivado en hidrólisis de soluciones de hidróxido de sodio. Estos dos son las más importantes al considerar los pretratamientos [33].

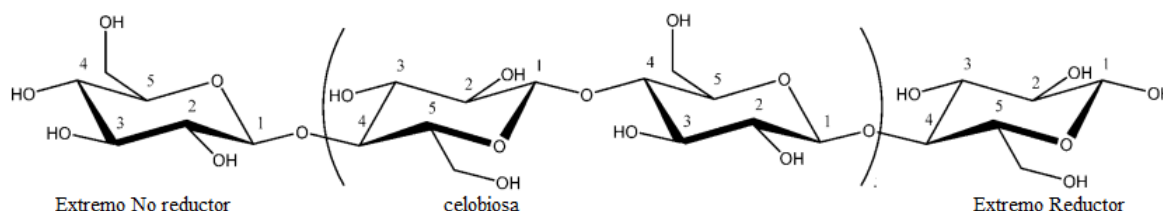


Figura 3. Estructura química de la celulosa

Fuente: Obtenida de [34].

En lo que corresponde a región amorfa, el ataque químico se hace más fácil mientras que en la región cristalina resulta más difícil la penetración de reactivos químicos, lo que quiere decir que al momento de someter alguna fibra natural a una maceración conviene clasificar su estructura física para poder evaluar si existe mayor aislamiento de componentes de interés [35].

La celulosa I y II son los dos principales polimorfos de la celulosa. La celulosa nativa es el polimorfo cristalino de tipo I. La celulosa tipo II tiene cadenas orientadas en disposiciones antiparalelas, que puede convertirse irreversiblemente en un polimorfo termodinámicamente estable. [36].

La celulosa posee un elevado peso molecular y un grado alto de polimerización. El grado de polimerización se refiere a la cantidad de monómeros que forman su estructura, es decir, el número de moléculas de glucosa unidas entre sí mediante un enlace glucosídico entre el carbono 1 y 4 en la cadena polimérica. El promedio del grado de polimerización depende del origen y el tratamiento de la celulosa [37].

Algo importante sobre este biopolímero es que, a pesar de no poder ser hidrolizado por los seres humanos y algunos animales, cumple un papel importante en la dieta diaria del hombre ya que mejora el trabajo del sistema digestivo [38].

1.2.2. Hemicelulosa

Las hemicelulosas son un grupo de heteropolisacáridos que se constituyen por cadenas cortas y ramificadas de azúcares, como se muestra en la figura 4. Entre estas se destacan, las pentosas (generalmente D-xilosa y L-arabinosa), hexosas (como D-galactosa, D-glucosa y D-manosa), así como ácidos urónicos (ácidos glucurónico, 4-O-metilgalacturónico y galacturónico) y desoxi hexosas (ramnosa y fucosa) [39],[40]. La naturaleza ramificada de las hemicelulosas determina su carácter amorfo, y la facilidad con que transcurren las reacciones de hidrólisis de los polímeros para dar lugar a sus azúcares constituyentes. Las hemicelulosas son más fáciles de solubilizar e hidrolizar que la celulosa [41].

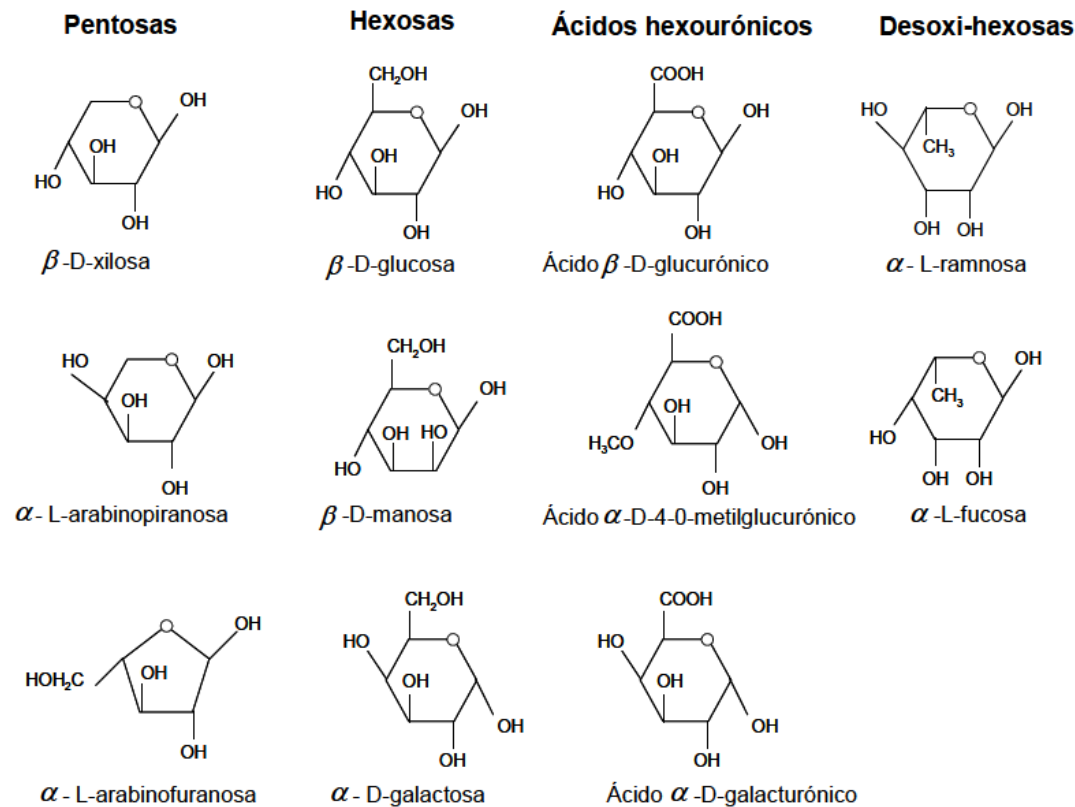


Figura 4. Estructura química de la hemicelulosa

Fuente: Obtenida de [42].

Dentro de la pared celular, las hemicelulosas tienen como función servir de interfase entre la celulosa y la lignina a través de puentes de hidrógeno entre los grupos $-\text{CH}_2\text{OH}$ de las cadenas de celulosa y los oxígenos glicosídicos de las hemicelulosas

La hemicelulosa acompaña a la celulosa de forma que la recubre y la une a la lignina como una forma de protección. Se considera como el segundo polisacárido en gran cantidad ya que forma parte de la pared celular vegetal, está presente aproximadamente entre un 30 a 35% del peso seco de los constituyentes que son parte de la estructura de sostén de las plantas. Además, en conjunto con la celulosa, la pectina y las glicoproteínas se agrupan para dar forma a la pared celular de los vegetales. Dichos polisacáridos son llamados así por tener un comportamiento muy similar al de la celulosa y se encuentran entreveradas dando origen a las microfibrillas, aportando de tal manera flexibilidad al tejido [43]. También se caracteriza por su baja masa molar en comparación con la celulosa y es más fácilmente que reaccione químicamente debido a que su estructura no es principalmente cristalina [37].

1.2.3 Lignina

Se trata de un polímero tridimensional amorfo formado por la polimerización de unidades de fenilpropano que implica la formación de diferentes tipos de enlaces que se alternan de manera desordenada. La mayoría de la lignina se encuentra situada en el espacio intercelular y en la pared primaria de la célula vegetal. [42].

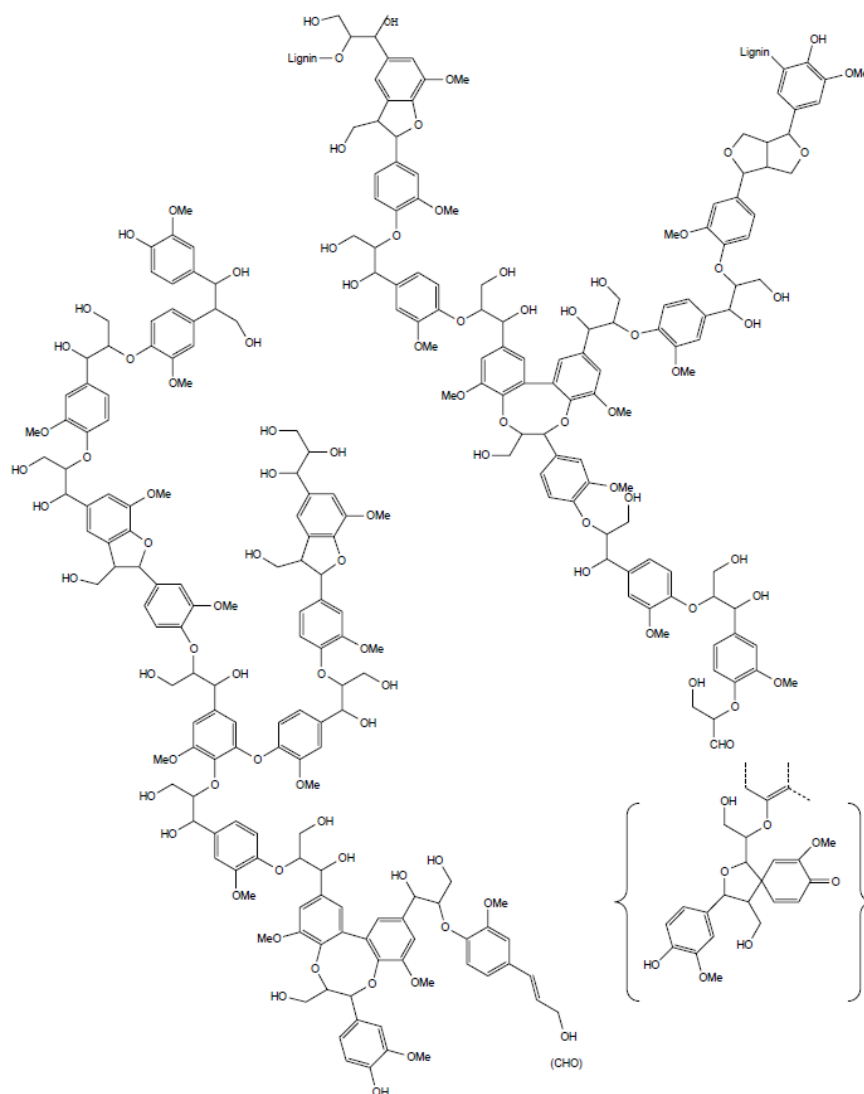


Figura 5. Estructura química de la lignina

Fuente: Obtenida de [44].

La lignina (Figura 5), según Ferrer [45] es un bio-compuesto muy soluble en álcalis más que ácidos, mediante los cuales es posible separarla de la celulosa, cumple la función de protección a las plantas y estructuras de las cuales hace parte, defendiéndose contra el ataque microbiano. Este polímero orgánico es de alto grado de carbono, ya que en su estructura están presentes en gran medida enlaces C-C y C-O-C. El contenido en lignina, al igual que en el caso de las hemicelulosas, difiere entre los diferentes materiales lignocelulósicos.

Tanto la lignina como la hemicelulosa pueden ser aisladas de la celulosa por medio de una digestión en soluciones de ácidos y bases, pero se deben controlar parámetros de reacción como el tiempo, temperatura y concentración. Si no es así, esto puede alterar la estructura y rendimiento de obtención en cuanto a la celulosa [46].

1.3. Industria del papel: Proceso, consecuencias y nuevas alternativas.

En relación al proceso de elaboración del papel, se dice que este puede variar dependiendo del tipo de papel, siendo uno de los más conocidos el denominado de proceso Kraft [47]. El proceso de obtención del papel tradicional se puede resumir en los pasos que se muestra en la figura 6 y se describe a continuación:

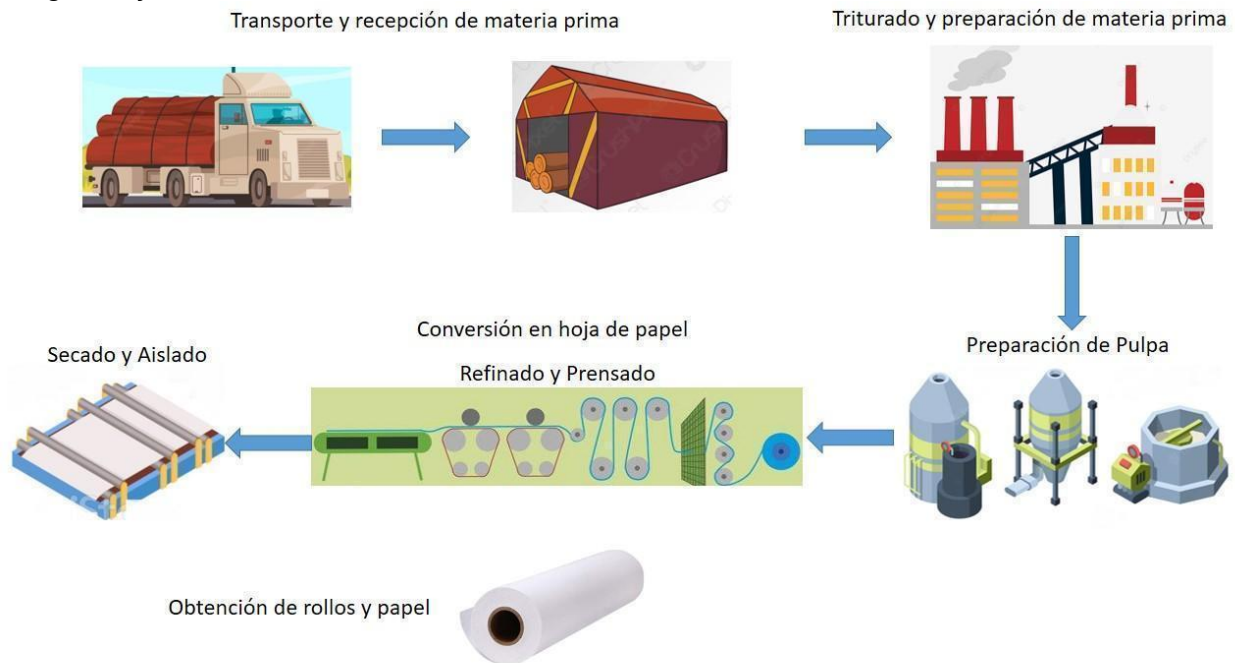


Figura 6. Elaboración de papel por proceso Kraft

Autores.

Como primer paso está la recepción y almacenamiento de la materia prima, aquí la madera es transportada a la fábrica en forma de troncos, que previamente han sido cortados para la extracción de la cáscara y la corteza. A continuación, se lleva a cabo el tratamiento de la materia prima, esta etapa transforma la madera en astillas de un tamaño homogéneo. El tercer paso es la preparación de la pulpa, según los procedimientos utilizados hay dos tipos de pulpa: La pulpa mecánica: los procesos de esta etapa son físicos triturando la madera para liberar las fibras convirtiendo hasta el 95% de la madera en pulpa; Pulpa química: la madera después de ser transformada en pequeños trozos es sometida a un cocimiento con productos químicos, y luego pasa por un proceso de refinado. Este procedimiento hace que se separe la lignina de la celulosa para que esta quede como producto final [48].

El cuarto paso es el blanqueo, en esta etapa se refina y se blanquea la pasta donde es agitada y por medio de un tratamiento químico las fibras se unen entre sí, luego pasa a otro lugar donde se agregan agentes químicos blanqueadores para eliminar el contenido de la lignina residual ya que esta produce una decoloración café en el papel final. Pasado este proceso, se continúa con la formación de la hoja a través de procesos tecnológicos, donde se propicia la estructura uniforme de la hoja. Como sexto paso está el prensado, una vez se forma la hoja de papel, pasa a la etapa de eliminación de agua a través de una máquina de prensado, ya que la hoja de papel todavía tiene un alto contenido de agua, de esta manera atraviesa una serie de rodillos de acero inoxidable que la comprimen, para expulsar la mayor cantidad de agua posible. A continuación, el secado y alisado el cual luego de ser prensado el papel pasa

a una serie de cilindros que son calentados mediante vapor para una deshidratación homogénea para pasar luego a otra serie de rodillos donde presionan ambos lados del papel para así alisar sus fibras. Por último, está la conversión la cual hace referencia a todo lo relacionado con el bobinado, cortado, embalaje y etiquetado, según requiera el cliente final [48].

De forma general, en la industria papelera se procesa la materia prima de fibras vegetales de celulosa, las cuales se entrecruzan formando una hoja resistente y flexible, y/o papel reciclado, productos químicos, agua y energía. El proceso de fabricación de papel, se puede dar a través de fibras vírgenes (materia prima extraída de la madera) o también con papel reciclado (hojas de papel ya usadas) [49].

Por otro lado, es conocido que, debido a la preocupación global por el medio ambiente, la sociedad está adoptando una serie de medidas para contribuir a la conservación de los ecosistemas y, por tanto, de los recursos naturales. En este sentido, la industria papelera es consciente de esta situación y se han adoptado una serie de medidas de ahorro de recursos. Precisamente, los retos a los que se enfrenta el sector papelerero durante los procesos de reciclado están relacionados con alcanzar los requerimientos físico-mecánicos del producto final [50].

La necesidad de incrementar el valor añadido del papel ha forzado a las industrias del sector papelerero a replantear su proceso de producción y producto final. Cabe destacar la mayor concienciación por el medioambiente de la sociedad, donde se busca sustituir algunos productos. Así, hoy en día, se pretende utilizar papel en algunas aplicaciones donde comúnmente se ha utilizado plástico y, por ello, se requieren ciertas propiedades que el papel no poseía. Del mismo modo que en el caso de la utilización de nano fibras de celulosa para la mejora de propiedades físico-mecánicas, su utilización como formulación de estucado también presenta oportunidades, pues se trata de un producto bio-basado, biodegradable y que, debido a sus dimensiones, permite dotar al papel de propiedades y funcionalidades diversas.[51].

Desde el punto de vista del aprovechamiento de residuos del sector agroindustrial, el proceso para la obtención de papel orgánico, con base en algunos estudios de la literatura [52], [53], se puede llevar a cabo siguiendo los siguientes pasos: en primera instancia el lavado de la materia prima, donde se elimina cualquier tipo de suciedad; El corte en trozos, en esta etapa se debe cortar el residuo en pequeños trozos para facilitar el proceso de cocción y de licuado. El siguiente paso es el remojo, en algunos procesos los trozos cortados se dejan remojar durante 24 horas para un mejor resultado, esta etapa puede ser considerada como opcional. El cuarto paso es la cocción, donde se cocina los trozos del residuo aproximadamente 1 hora; Luego de cocinar y dejar enfriar se procede a licuar, añadiendo un poco de agua hasta obtener una pulpa con partículas de fibra pequeñas y uniformes para poder tener un papel flexible y de textura suave. Después de ser licuado se pasa a un recipiente donde se le agrega agua y se revuelve para crear una mezcla uniforme. Se procede así con el proceso de tamizado, el cual consiste en sumergir hasta el fondo el tamiz de madera en el recipiente que contiene la fibra y lentamente levantarlo con un movimiento uniforme para que quede impregnada encima y luego se deja escurrir para eliminar el exceso de agua. Finalmente, está el secado luego de haber dejado escurrir se procede a poner encima un trozo de tela como una manta, se deja secar a la sombra y en lugar con ventilación por uno o dos días [54].

Cabe resaltar que los pasos descritos previamente se realizan de forma individual y de forma artesanal, lo que conlleva tiempos largos en el proceso de producción del papel orgánico.

1.4. Aprovechamiento de residuos agroindustriales

Con referencia a los desechos agroindustriales se ha reconocido la importancia de los residuos ligno-celulósicos, ya que son abundantes a partir de los recursos naturales. Los materiales de biomasa son una de las fuentes más destacadas actualmente debido a que contienen una proporción considerable de carbono neutro. De todas las fuentes de biomasa la celulosa y la quitina son los materiales más diversos de plantas y residuos alimenticios. El aprovechamiento de este tipo de residuos se convierte en una estrategia ambiental y económica adecuada de manejo de subproductos o residuos agroindustriales. Al momento de seleccionar la alternativa más apropiada para el aprovechamiento y posterior tratamiento de un residuo agroindustrial específico, es necesario conocer su composición, la calidad de sus componentes, la cantidad que se genera y tener en cuenta que este proceso produce un nuevo residuo más agotado que puede tener otra aplicación o convertirse en un desecho [50].

Para este caso, los residuos orgánicos deben ser secados o deshidratados con el fin de extraer por medios físicos el agua contenida, debe tenerse en cuenta que el nivel de agua varía de acuerdo al residuo orgánico. Existen diferentes alternativas de secado: solar controlado, por aire caliente, por aspersión o deshidratación por ósmosis [55].

Así, entre los desechos agroindustriales, se tiene los materiales generados a partir del bagazo de la caña de azúcar y del bagazo del agave, en las industrias alimentarias que conservan propiedades mecánicas flexibles y fuertes. De esta forma, en la regeneración industrial dicha celulosa extraída o aislada, podría convertirse en materiales avanzados de fibras de carbono y/o películas biodegradables. [8].

Además, a partir de los desechos se pueden generar bio-compósitos, los cuales son un material polimérico que presenta características biodegradables debido a que sus componentes son de origen biológico, ya sea como matriz o agente reforzante [56]. Un bio-compósito es aquel material compuesto que está constituido por una o más fases de naturaleza biológica. Se usan materiales lignocelulósicos en matrices termoplásticas para formar bio-compósitos [6], siendo que generalmente la proporción de ésta oscila entre los 5 y 30%. En la actualidad, este tipo de materiales han ido tomando relevancia cada vez más, debido a sus diferentes aplicaciones como empaques de alimentos, bolsas, en la industria automotriz, médica, entre otras, además de ser materiales que generan un mejor impacto ambiental en comparación de los polímeros convencionales a base de fuentes petroquímicas.[57].

Con base en un análisis de la bibliografía, se pudieron establecer algunas fuentes de residuos orgánicos y procesos usados para el aislamiento de la celulosa, los cuales se resumen en la Tabla III.

Tabla III. Fuentes, métodos de extracción y aplicaciones de la celulosa.

FUENTES	METODOS DE EXTRACCION	RENDIMIENTO (%)	APLICACIONES	REFERENCIA
Bagazo de Agave	Hidrólisis H ₂ SO ₄	NA	Agente de refuerzo para nanocompuestos	[58]
Pulpa y Bagazo de Manzana	Hidrólisis NaOH	NA	Aromatizantes	[59]
Espárragos	Hidrólisis H ₂ SO ₄	NA	Estabilización de O / W(aceite y agua). Emulsiones Pickering	[60]
Fibras de Bamboo	Hidrólisis H ₂ SO ₄	30	Agente de refuerzo para nanocompuestos	[61]
Brote de Bamboo	Hidrólisis H ₂ SO ₄	51	Inmovilización de enzimas, ingeniería de tejidos	[62]
Pseudotallo de Banana	Hidrólisis H ₂ SO ₄ y NaOH	19	Agente de refuerzo para nanocompuestos	[63], [64], [65].
Paja de Cebada	Hidrólisis H ₂ SO ₄	69	Masilla de refuerzo	[58]
Cáscara de Café	Hidrólisis H ₂ SO ₄	NA	Agente de refuerzo para biocompuestos	[66]

Como observado en la tabla III, para los procesos de extracción de celulosa, se utilizan básicamente dos rutas, las cuales se describen a continuación.

1.4.1 Hidrólisis alcalina

Los pretratamientos alcalinos utilizan bajas presiones y temperaturas en comparación con otras tecnologías. Este pretratamiento se puede hacer a condiciones ambientales pero los tiempos de operación son del orden de horas o días en vez de segundos o minutos como los ácidos diluidos. Los compuestos alcalinos son utilizados como reactivos, los cuales son convertidos en sales o incorporados como sales en la biomasa. Las tecnologías alcalinas son muy parecidas al pulpeo Kraft, donde la remoción de la lignina es el principal objetivo, así como grupos acetilo y ácidos urónicos de la hemicelulosa, aumentando la reactividad de los polisacáridos remanentes. Además de mejorar el acceso de las enzimas a la celulosa por encontrarse más expuesta, también mejora la efectividad de las mismas ya que con la eliminación de la lignina se reducen los sitios de adsorción no productivos.[67]

1.4.2. Hidrólisis con ácido concentrado y con ácido diluido.

Por otro lado, se tiene la hidrólisis ácida, donde se han probado ácidos concentrados como H₂SO₄ y HCl con el fin de solubilizar los azúcares provenientes tanto de la celulosa como de la hemicelulosa. Sin embargo, tiene muchas desventajas como la corrosión de equipos y la

necesidad de recuperación o neutralización del ácido. En los ácidos diluidos, el ácido sulfúrico es el más utilizado, otros ácidos como el nítrico, el hidróclórico y el fosfórico han sido probados. Este pretratamiento se usa ampliamente para la solubilización de hemicelulosa con el fin de incrementar la digestibilidad de la celulosa en procesos de hidrólisis enzimática. [67]. De este proceso de hidrólisis se producen fragmentos con cadenas más cortas conservando la estructura básica. Las regiones amorfas de la celulosa son las más susceptibles a las reacciones hidrolíticas que la región cristalina [68].

1.5. Sistemas para el procesamiento de papel orgánico

Teniendo en cuenta los procesos para la obtención de papel y las variables a controlar, a seguir se definen algunas características de dos elementos básicos de este proceso, el biorreactor y el compactador.

1.5.1. Bioreactor

Para este tipo de procesos se destacan los biorreactores tipo tanque agitado (BTA), los cuales son empleados a escala del laboratorio para investigación básica, así como a nivel industrial, en la producción de biofármacos con una capacidad de producción de varios kilogramos. Las características de estos equipos, dependen mucho de las condiciones de operación y del uso de criterios de escalamiento apropiados [69].

La figura 7, muestra las características básicas de un biorreactor de tanque agitado (BTA), el cual está compuesto de una camisa exterior, puertas de extracción y drenaje, sensores y actuadores para medición y control al interior del equipo.

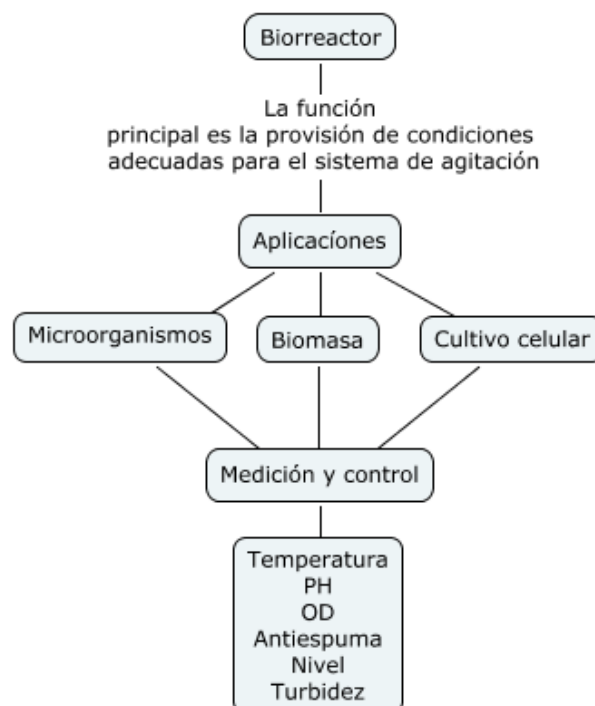


Figura 7. Características y aplicaciones de un Biorreactor

Los materiales, generalmente usados son, para el vaso se usa una pared doble en acero inoxidable o vidrio [70], entradas de la tapa; Pozo para sensor de pH; Pozo para sensor de O₂; Entradas para la adición de ácidos; Entrada triple (para la adición de base, antiespumante

y nutrientes); Sensor de nivel regulable (líquido/espuma); Tubo de muestreo regulable; Septo para el inóculo; Condensador de reflujo en acero inoxidable [71].

Para los parámetros y/o variables que se desea monitorear o sensor se usa: Controlador de temperatura y agitación; Sensores y Actuadores: Sensores temperatura, redox pH, dO₂ (polarográfico u óptico); dCO₂, O₂ gaseoso y CO₂ gaseoso; Mezclador de gases para O₂, CO₂, N₂ y Aire; Medidor/Controlador másico automático de salida, Compresor de aire, exento de aceite con silenciador de ruido [72].

Así, se identifican algunas variables necesarias para este proceso, las cuales son el control de velocidad para el motor de agitación, el control de temperatura que permite activar reacciones térmicas al controlar una resistencia de calor al interior del BTA, diversas salidas para controlar variables del proceso como pH, oxígeno disuelto, dosificadores, entre otros.

A seguir se presenta la imagen real de un biorreactor de Technal Equipos Científicos, que consta de control de temperatura, agitación, pH, y oxígeno disuelto y su precio puede llegar a \$100.000.000 de pesos.



Figura 8. Biorreactor de Vidrio TECHNAL.

Fuente: Obtenida de [72].

1.5.1.1. Funciones principales de un reactor

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del equipo, con el fin de conseguir la mezcla deseada de las fases presentes;
- Proporcionar suficiente tiempo de contacto entre las sustancias y con el catalizador, de ser el caso, para conseguir la extensión de la reacción deseada;
- Permitir condiciones de temperatura, presión y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, cumpliendo con los aspectos termodinámico y cinético de la reacción. [73]

1.5.1.2. Clasificación de los reactores

Reactores Ideales

un reactor es considerado ideal si cumple con los siguientes requisitos [74]:

- Los reactantes están mezclados a la entrada del reactor, es decir, el tiempo de mezcla es cero y todo el volumen es útil para la reacción.
- No se forman agregados moleculares.
- Se sigue un modelo de flujo ideal: este tiene dos extremos de mezcla que representan la máxima mezcla posible y la inexistencia de esta y que constituyen los dos modelos de flujo ideales posibles.

Hay tres tipos de reactores ideales como lo muestra la figura 9

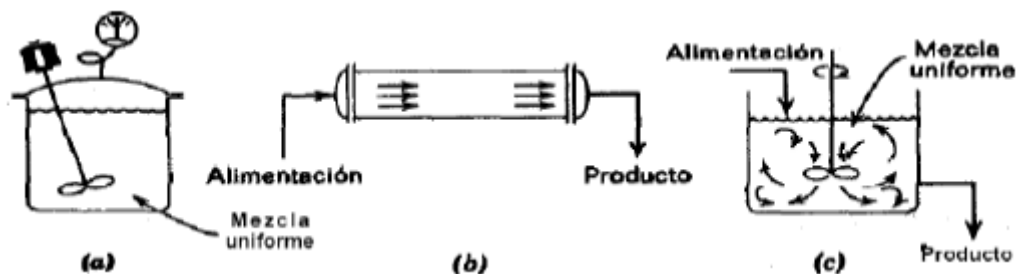


Figura 9. Tipos de reactores ideales: (a) Reactor discontinuo, (b) Reactor de flujo en pistón, (c) Reactor de mezcla completa.

Fuente: [74]

- “El primero es un reactor discontinuo en donde los reactantes se introducen en el reactor, se mezclan, se deja que reaccionen en un tiempo determinado y finalmente se descarga la mezcla resultante. Es ésta una operación no estacionaria en la que la composición va variando con el tiempo, aunque en cada instante es uniforme en todos los puntos del reactor.
- El primero de los dos reactores ideales de flujo estacionario, es el Reactor de flujo en pistón, este reactor se caracteriza porque el flujo del fluido perpendicular a una sección transversal es ordenada, sin que ningún elemento de este sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquél; en realidad, en este reactor puede haber mezcla lateral de fluido, pero nunca ha de existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria de flujo. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo en pistón es que el tiempo de residencia en el reactor sea el mismo para todos los elementos del fluido.
- El otro reactor ideal de flujo estacionario, se denomina reactor de mezcla completa, y como su nombre indica, es el reactor cuyo contenido está perfectamente agitado y su composición en cada instante es la misma en todos los puntos del reactor. Por consiguiente, la corriente de salida de este reactor tiene la misma composición que la del fluido contenido en el mismo.” [75]

1.5.1.3. Tipos de proceso en biorreactores

Existen 3 tipos de procesos los cuales son:

- Procesos continuos
- Procesos discontinuos
- Procesos semicontinuos

En la figura 10 se puede observar los tipos de procesos.

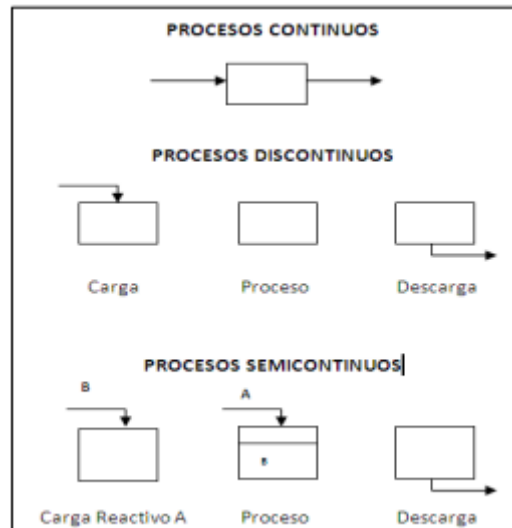


Figura 10. Tipos de procesos.

Fuente: [73].

1.5.1.3.1. Procesos Continuos

En este tipo de proceso se lleva a cabo en recipientes con agitación, pueden ser de modo simple o en cascada, con tuberías de flujo de descarga. En estos procesos los reactivos son cargados al reactor y los productos son descargados constantemente. [73] De esta manera los flujos de entrada y salida son fijos.

1.5.1.3.2. Procesos Discontinuos

Los discontinuos son aquellos donde todos los reactivos son introducidos al inicio de la reacción y se vacían cuando el proceso está completo. La flexibilidad de este tipo de procesos hace que sean utilizados mayormente en la industria química, alimentaria o farmacéutica. [73]

1.5.1.3.3. Procesos Semicontinuos

El manejo de este proceso como se muestra en la figura 8.2 concluye en insertar un reactivo de forma discontinua, y agregar otro reactivo de manera continua durante el tiempo de reacción, así que en este caso la masa total de la mezcla no se mantiene constante [73] pues en el periodo de la reacción se puede retirar y incorporar material de forma casi continua.

1.5.2. Tipos de Reactores

1.5.2.1 Reactor CSTR

Este reactor CSTR ("Continuous Stirred Tank Reactor") como se muestra en la figura 11, conocido como reactor de tanque con agitación continua o de mezcla total. Son reactores en los que hay una alimentación de reactivos y una extracción de productos constantemente. [76] En este equipo se mantiene la constancia de las variables como la temperatura, la presión, y concentración siendo las mismas en todo el reactor, así como las propiedades a la salida del CSTR. En la industria es muy requerido, ya que su producción puede ser llevada a grandes escalas. [77]

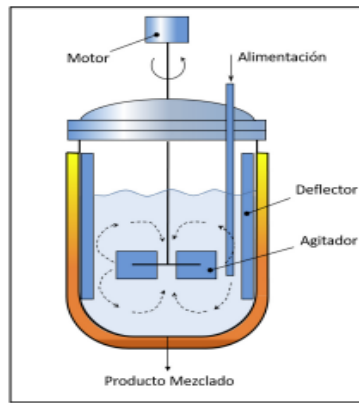


Figura 11. Reactor CSTR. [77].

1.5.2.2. Reactor Tubular

Los reactores tubulares o también llamados reactores PFR ("Plug Flow Reactor"), consiste de un tubo cilíndrico dentro del cual fluye la reacción y normalmente se mantiene en condiciones estacionarias, igualmente que el CSTR funciona de forma continua, quiere decir que su sistema presenta entrada y salida constante de reactivos y productos. [76],[77] en la figura 12 se muestra un reactor tipo PFR.

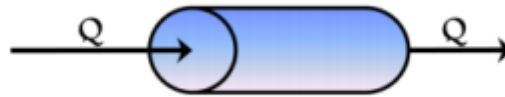


Figura 12. Reactor tipo flujo pistón (PFR). [76]

1.5.2.3. Reactor BATCH

Los reactores batch o igualmente conocido como reactor por lotes,[77] son equipos donde no existe flujo de entrada ni salida, es sencillamente un reactor con un agitador que homogeniza una mezcla.[76] Por otra parte, este tipo de proceso batch, se utiliza en operaciones a escalas pequeñas, pruebas de nuevos procesos, fabricación de productos costosos, y procesos que difícilmente puedan ser operaciones continuas. Este reactor es apropiado para procesos químicos, farmacéuticos y biotecnológicos.[77] En la figura 13, se presenta un diagrama de un reactor ideal tipo batch.

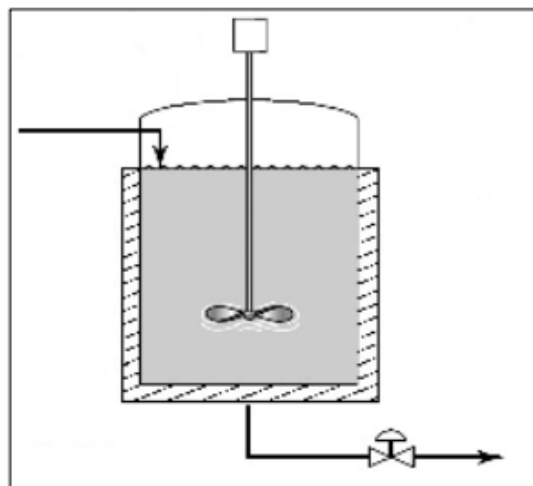


Figura 13. Reactor tipo Batch. [74]

1.5.2.3.1. Ventajas y desventajas de un reactor Batch

Tabla IV. Ventajas y desventajas de un reactor tipo batch

Ventajas	Desventajas
Se pueden alcanzar altas conversiones dejando los reactantes por largos periodos de tiempo de reacción.	Requiere un ciclo de operación complejo
Bajo costo inicial	Mayor costo de operación
Puede ser usado para varias reacciones consecutivamente	Difícil producción a gran escala
Buenos para obtener datos cinéticos, mientras se esta en una etapa de testeo	Largos periodos de tiempo muerto
Su operación es sencilla	Elevados costos de mano de obra
Fácil de parar y limpiar	La calidad del producto es variable

Fuente: Obtenida de [73]
elaboración: Autores

1.5.2.4. Ecuaciones de diseño

Al realizar un diseño de un reactor ideal, es preciso primero realizar un balance de materiales, [78] como se evidencia en la figura 14.



Figura 14. Balance de masa. [79].

Por otra parte, en el reactor ideal tipo batch no existe flujo de entrada ni de salida, es sencillamente un agitador que homogeniza la mezcla como ya se había mencionado antes. Para entender un poco más este tipo de reactores, se plantea la ecuación de balance de masa de la siguiente manera:

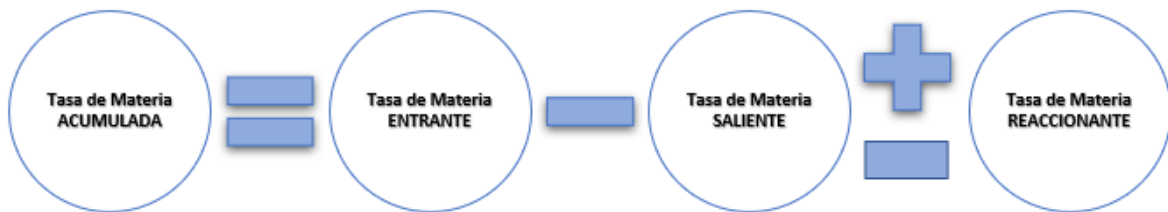


Figura 15. Balance de masa Reactor Batch.[79]

En un reactor Batch como no hay flujo de entrada, ni de salida, por lo tanto, los dos primeros términos son cero.

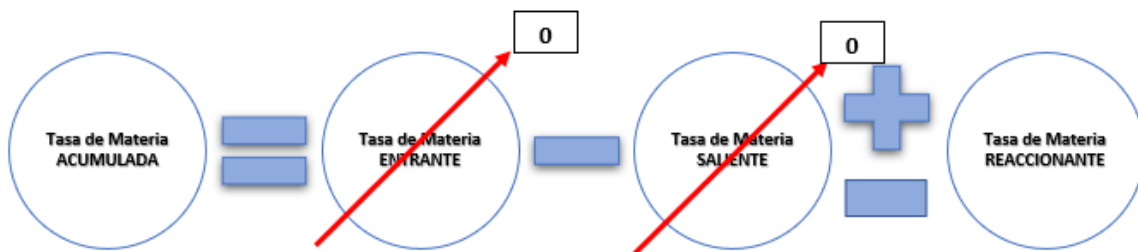


Figura 16. Balance de masa Reactor discontinuo ideal tipo Batch.[79]

De esta manera el balance de materias para este tipo de reactor será:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} = 0$$

$$0 - 0 + \text{Generación} - \text{Consumo} = 0$$

$$(-r_A V) - \frac{dN_A}{dt} = 0 \quad \text{Ecuación 1.}$$

siendo V el volumen del fluido en el reactor y $(-r_A)$ la velocidad de reacción para el componente limitante. Evaluando los términos de la ecuación anterior se puede calcular el tiempo de residencia necesario para alcanzar la conversión deseada [73].

$$(-r_A V) = \frac{dN_A}{dt}$$

$$(-r_A V) = N_{A0} \frac{dX_A}{dt}$$

$$\int_0^{X_A} \frac{N_{A0}}{-r_A V} = t$$

Dónde:

X = Conversión lograda (está relacionada con la concentración).

$$C_{A0}X_A = C_{A0} - C_A$$

X toma un valor entre 0 y 1

1.5.2.5 Agitación

La agitación es un cálculo importante en un reactor, ya que este, se encarga de poner en contacto los reactivos y catalizadores en la reacción, sean estos en la misma fase (líquido-líquido), o en diferentes fases (líquido-gas; líquido-sólido) [78]. El diseño de la agitación atiende dos factores: el grado de homogeneidad y el periodo de la mezcla. [79]

1.5.2.6. Tipos de Agitación

Los agitadores se clasifican en dos tipos (ver Figura 17):

- Agitadores de flujo axial: son agitadores cuyas aspas forman un ángulo menor a 90°C respecto al plano de rotación, pueden ser: hélices marinas, turbinas de aspas inclinadas, agitadores helicoidales, agitadores de hojas.
- Agitadores de flujo radial: Son agitadores cuyas aspas forman un ángulo de 90°C respecto al plano de rotación, pueden ser: turbinas o agitadores de anclaje.

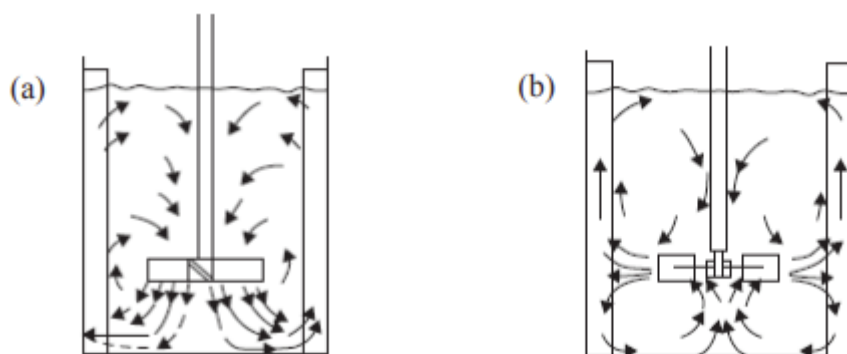


Figura 17. Patrones de flujo. (a) Flujo axial. (b) Flujo Radial. [80]

A su vez existen tres tipos de mezcladores (ver figura 18): hélice, paletas y turbina. Cada uno tiene subtipos, pero con estos tres tipos se resuelve aproximadamente el 95% de los problemas de agitación de líquidos. [73] [80].

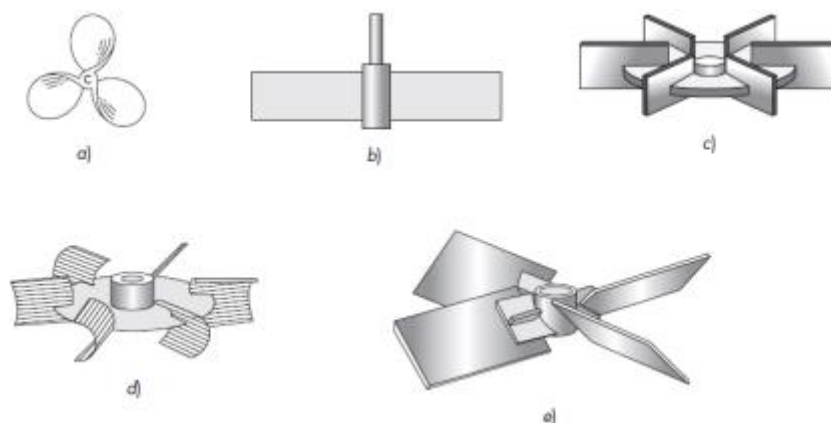


Figura 18. Mezcladores para líquidos de viscosidad moderada: a) agitador marino de tres palas; b) turbina simple de pala recta; c) turbina de disco; d) agitador de pala cóncava; e) turbina de pala inclinada [83].

Tabla V. Tipos de mezcladores

Tipos de mezcladores	Características
Mezcladores de paletas	• Giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque • Impulsa el líquido radial y tangencialmente • Son los mas conocidos, y los primeros en los que se piensa cuando se requiere un reactor • Costo inicial generalmente bajo
Mezcladores de hélices	• Agitador de flujo axial • Velocidad de operación elevada y se emplea para líquidos poco viscosos • Los agitadores de hélice pequeños giran a la máxima velocidad del motor, unas 1150 o 1750 rpm; los mayores giran a 400 a 800 rpm
Mezcladores de turbinas	• Se asemejan a agitadores de múltiples y cortas paletas • Giran a velocidades elevadas sobre un eje que va al centro del tanque • Las paletas son rectas o curvas, inclinadas o verticales. • Son eficaces para una gran variedad de viscosidades

Fuente: [73]. Elaboración propia

1.5.2.7. Diseño de agitadores

Potencia de agitación

Para el diseño de agitadores es preciso determinar la potencia para accionar el rodete del sistema del agitador, el cálculo de esta potencia debe realizarse a partir de datos experimentales.[79] Por lo tanto para hallar la potencia se requiere de la definición del número de Reynolds.

Las variables que pueden ser controladas y que influyen en la potencia consumida por la agitación son:

- Dimensiones principales del tanque y del rodete: Diámetro del tanque (D_t), diámetro del rodete (D_a), altura del líquido (H), ancho de la placa deflectora (J), distancia del fondo del tanque hasta el rodete (E), dimensiones de las paletas.
- Viscosidad (μ) y densidad (ρ) del fluido.
- Velocidad del giro del agitador(N). [73]

Transferencia de calor

En los reactores ideales discontinuos tipo batch, el sistema mayormente utilizado es el serpentín de calentamiento, el cual provee un área de transferencia grande debido a las vueltas y aun bajo costo.[73]

Transferencia de calor en un reactor

Se rige por la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta T \text{ Ecuación 2.}$$

donde:

Q= Flujo de calor que se transmite.

U= Coeficiente global de transferencia de calor.

A= Área de Transferencia.

ΔT = Gradiente de temperatura.

1.5.3. Compactador

Para este tipo de sistemas generalmente se tiene en cuenta el método de moldeo por compresión. Este es un método de alta presión, adecuado para el moldeo de piezas complejas, de alta resistencia y con refuerzos en su matriz. En particular, se usan compuestos termoplásticos, aunque en menor medida, también son moldeados por compresión con refuerzos de cintas unidireccionales, tejidos, fibras orientadas al azar o de hilos cortados.[84]

El ciclo empieza con la apertura del molde para la extracción de la pieza obtenida en el ciclo anterior. Una vez limpio el molde se coloca en él las inserciones metálicas si las hubiere y se introduce el material en preformas o molde que están cerca de la forma del producto final. Generalmente, la materia prima se carga normalmente a mano en un molde abierto; se cierra el molde caliente y se aplica presión. Finalmente, se aplica toda la presión al molde caliente y con la acción conjunta del tiempo y calor tienen lugar el conformado de la pieza [85].

En el caso de las biomásas residuales de composición lignocelulósica, la celulosa y la lignina forman una sustancia propiamente fibrosa y la hemicelulosa, sirve de aglutinante para las fibras.[86]La humedad del material influye en la transferencia de calor y en la plasticidad del material, siendo que, un material muy húmedo o seco incrementa la necesidad de temperatura y/o presión [86].

Cabe recalcar que este método es eficiente y económico en comparación con otros métodos de conformado[87]. Así, existen diferentes tipos de moldes de compresión, los cuales se describen a continuación (ver figura 19) [87]:

1.5.3.1. Moldes estándar

También llamado simple, se usa para moldear piezas con geometría sencilla, estos constan de dos partes, el molde macho y hembra que son básicamente dos tapas, una la cual se compone de una cavidad donde se coloca el material a moldear, el otro molde se abre y cierra para la compactación.

1.5.3.2. Moldes positivos

En este tipo de moldes toda la fuerza de cierre actúa sobre la cavidad, pero a su vez presentan serios inconvenientes, principalmente que el espesor de la pieza dependerá de la cantidad de mezcla introducida, lo que obliga a una dosificación muy exacta si se quiere obtener regularidad de espesores de producción.

1.5.3.3. Moldes semi positivos

Una solución intermedia es el molde de tipo semi positivo, hace que inicialmente toda la fuerza de cierre se ejerza sobre la mezcla, para facilitar el moldeo de la pieza, pero debe tener ranuras que permitan la evacuación del exceso de mezcla y permita el cierre total de ambas mitades.

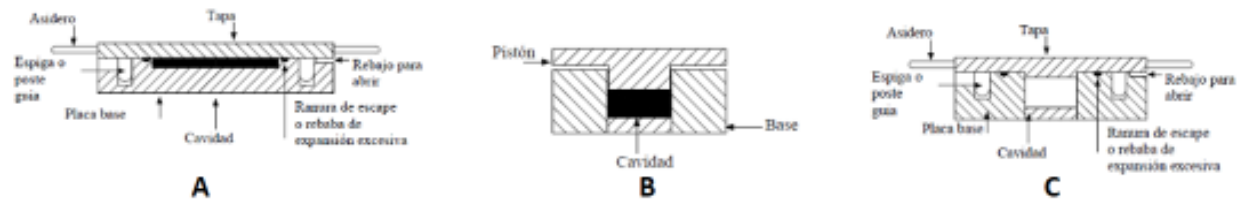


Figura 19. Tipos de moldes. (a) Simple, (b) Positivo y (c) semi positivo.

CAPÍTULO II – Materiales y métodos

Con base en los objetivos propuestos la presente investigación se dividirá en dos etapas. La primera etapa consiste en aplicar un desarrollo experimental desde el punto de vista de la síntesis y procesamiento de materiales que busca una ruta para la extracción de celulosa a partir del pseudotallo del plátano. La información recolectada de esta fase, será el punto de partida para el desarrollo del diseño de un prototipo del proceso semiautomático para los procesos de extracción de celulosa y posterior conformado de papel orgánico.

Los procedimientos, métodos y equipos de laboratorio se hacen usando la infraestructura del área de Nanotecnología y Biotecnología del tecnoparque SENA sede Popayán.

2.1 Síntesis y procesamiento de papel orgánico a base del pseudotallo de *Musa × paradisiaca*

La utilización de fibra de plátano como materia prima para la obtención de celulosa y elaboración de papel orgánico, surge como una alternativa con el objetivo de mitigar los efectos ambientales producidos por la fabricación y poca reutilización de papel a partir de recursos maderables, así como también por la mala disposición de residuos provenientes de la cosecha de plátano y banano.

En particular, el proceso de cosecha de plátano y banano, una vez al finalizar la recolección del fruto, la planta se corta para la próxima cosecha, este deshecho será la materia prima para la obtención de fibra y celulosa.

Así, para el pseudotallo del plátano fue posible identificar una ruta para su aprovechamiento en la obtención de celulosa, la cual se describe en el siguiente diagrama, ver figura 20.

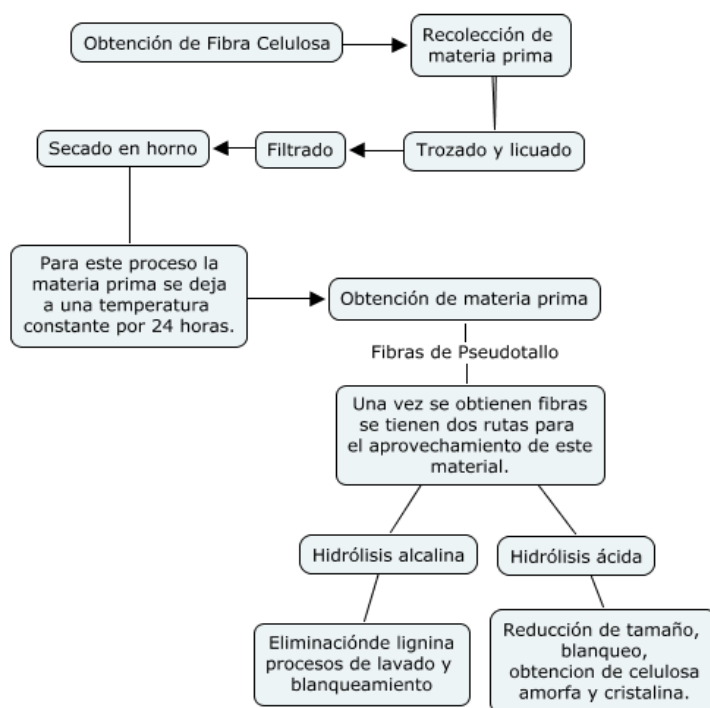


Figura 20. Ruta de aprovechamiento del pseudotallo de plátano y banano.

2.1.1. Adecuación de la materia prima

Dado que el departamento del Cauca posee una gran producción y cultivo de plátano se busca una fuente cercana que pueda brindar la recolección de desechos post cosecha para ser utilizados en la extracción de celulosa.

Tras la recolección del fruto del cultivo de banano y plátano se corta la planta casi en su totalidad; se recolecta el tallo y se obtiene el pseudotallo, el cual es un tallo falso al interior de la planta. Este se obtiene tras quitar las capas externas del tallo que han madurado y han estado expuestas al exterior de la planta, y se obtiene un vástago amarillo, como se muestra en la figura 21.



Figura 21. Adecuación de la materia prima mostrando el pseudotallo del plátano obtenido.

2.1.1.1. Extracción y Lavado de fibras

Aquí el pseudotallo de la planta, se corta en pedazos pequeños de tal manera que permita licuar todo el material, a fin de formar una pasta que facilite su manipulación. La figura 22 muestra algunos detalles de este proceso.



Figura 22. Adecuación de la materia prima mostrando el pseudotallo del plátano obtenido.

Para esta etapa se usa una licuadora convencional y se adiciona agua para reducir el tamaño del material. A continuación, se filtra el material a través de un colador y se pesa la cantidad de fibra húmeda que se obtiene. El peso del pseudotallo trozado fue de 3.2 kilos y la fibra licuada y filtrada pesó 2 kilos.

2.1.1.1. Secado en horno

A partir de la adecuación del material se dio paso a la obtención de la fibra y celulosa. Para esto se procede al secado en horno tipo mufla a una temperatura de 40°C durante 48h, para obtener una fibra seca para una mayor precisión en la adición de reactivos (Figura 23).



Figura 23. Fibra de Pseudotallo seca.

2.1.2. Procesamiento de las fibras para extracción de celulosa

Para el procesamiento de las fibras del pseudotallo del plátano y extracción de celulosa se plantea el siguiente diagrama de flujo (ver figura 24). Aquí, se modifican parámetros, tales como, las proporciones (material:reactivos), temperatura y tiempo de agitación, usos de reactivos, uso de equipos donde se procesa el material y se caracteriza estructural y térmicamente el material en cada paso.

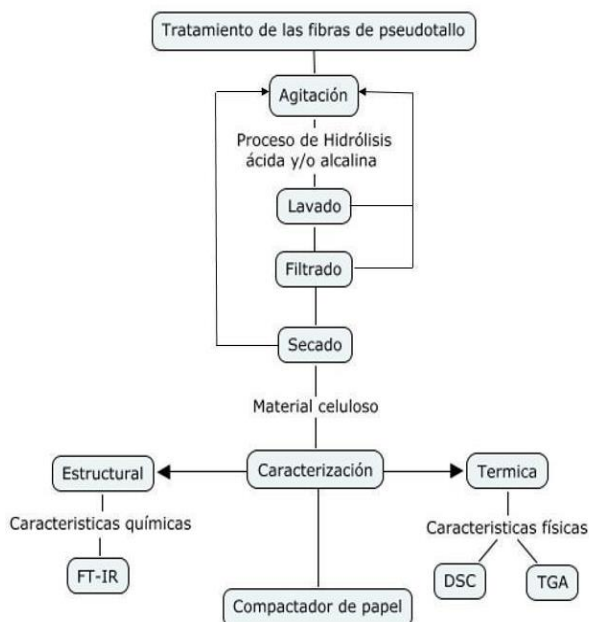


Figura 24. Metodología para el procesamiento de fibras

Debido a que el tratamiento de fibras conlleva varios procesos, se presentan a continuación elementos que se usan para los experimentos de laboratorio y su posterior caracterización (ver figura 25 y Tablas 5 y 6).

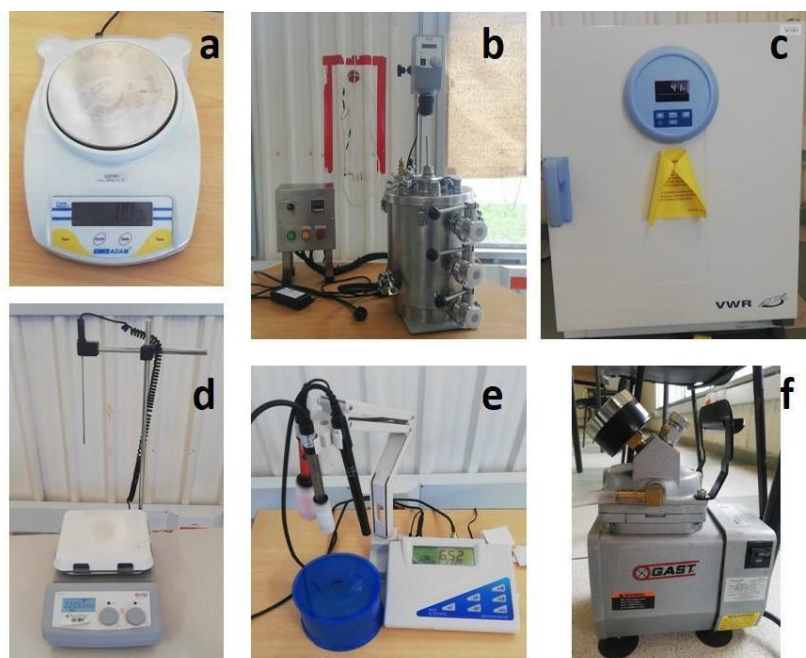


Figura 25. Equipos de laboratorio usados (a) Balanza marca Adam, (b) Bioreactor- Walter Velazco 10L, (c) Horno tipo mufla - VWR 115 L, (d) Plancha térmica con agitación magnética - Dlab, (e) Multiparámetro (PH) - Sper Scientific y (f) Bomba de vacío - GAST.

Tabla VI. Materiales de laboratorio

Materiales
Material de vidrio (Vasos de precipitación, embudos, probeta, matraces Erlenmeyer, balones aforados, varillas de agitación)
Material de laboratorio (Espátulas, frascos, varillas de agitación magnéticas)
Cajas Petri
Filtros de Papel

Tabla VII. Reactivos

Reactivos	Nomenclatura química	Empresa	Pureza (%)
Agua destilada	H_2O	Quimpo	99%
Hidróxido de Sodio	$NaOH$	PanReac AppliChem	98%
Peróxido de Hidrogeno	H_2O_2	Quimpo	10%
Acido Sulfúrico	H_2SO_4	PanReac AppliChem	96%
Acido Nítrico	HNO_3	Quimpo	55%
Acido Clorhídrico	HCL	Quimpo	38% o 0.1N
Acido Acético	CH_3COOH	Quimpo	5%

2.1.3. Caracterización de las muestras

Para este paso se utilizan diferentes equipos para la caracterización del material, a continuación, se describen los tipos de análisis que se realiza al material y equipos usados.

2.1.3.1. Microscopía electrónica de barrido

Esta técnica utiliza un haz de electrones para formar una imagen y se usa con el fin de observar la microestructura de las fibras de plátano y sus variaciones en cada proceso realizado. Para esto se usó un microscopio electrónico de barrido TESCAN Vega 3.

2.1.3.2. Calorimetría diferencial de barrido

Esta caracterización se realiza mediante la medición del cambio de calor asociado con la desnaturalización térmica del material cuando se calienta a un ritmo constante. Aquí se hizo uso de un DSC SDT Q600 de Texas Instruments, operando en un rango de temperatura de 25 a 550 °C con una tasa de calentamiento de 10°C/min.

2.1.3.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

Esta técnica permite caracterizar la estructura del material mediante la identificación de los grupos funcionales presentes, a través del estudio de la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y las muestras analizadas. El ensayo de espectroscopia de las fibras se realizó en el equipo FTIR-Jasco 4100 tomando espectros en el rango de 5000 a 500 cm^{-1} .

2.1.3.4. Termogravimetría

Esta medición se realiza con el fin de analizar la estabilidad térmica del material. Así, la dinámica de las fibras y membranas se llevaron a cabo con el instrumento SDT Q600 de Texas Instruments. Las pruebas se realizaron en un rango de temperatura entre 10°C y 600 °C con un calentamiento constante de 10°C/min.

2.1.4. Conformado del papel orgánico

Para la compactación del material extraído y dar origen al papel orgánico, se usa un troquel compactador hembra-macho que permite la obtención de papel orgánico con una geometría circular de 7.5 cm de diámetro, para este proceso se aplica una carga de aproximadamente 865 N. La figura 26, muestra el troquel de compactación usado, el troquel presenta oxido por lo cual se usa vinipiel para protección de material sometido a compactación.



Figura 26. Troquel de compactación.

2.2 Diseño del prototipo para el procesamiento de papel orgánico con base en el pseudotallo del plátano.

Para el desarrollo de los sistemas semi-automatizados a ser usados en el procesamiento de papel orgánico, se siguió la metodología de diseño de sistemas mecatrónicos (ver figura 27), donde se integran componentes electrónicos y mecánicos, pensados a través de condiciones previas experimentales del proceso. De esta forma, el diseño mecatrónico se basó en cuatro etapas básicas: requerimientos del sistema, modelado, simulación y diseño del prototipo, los cuales se orientan para cumplir el objetivo planteado.

En este sentido, con base en los resultados previos donde definió el proceso de obtención de celulosa y fibra para su aprovechamiento en el conformado de papel orgánico. Así, se logra en primera instancia conceptualizar y realizar un bosquejo del sistema semiautomatizado; a seguir se plantea un diseño eléctrico, neumático y de control para el correcto funcionamiento de los diferentes sistemas usando software EDA (Electronic Design Automation / Automatización de Diseño Electrónico).

Con base en el diseño de sistemas mecatrónicos, se procede a la virtualización del sistema a través del diseño asistido por computador (CAD), donde se diseña cada parte del prototipo y se realiza un análisis estructural a través de elementos finitos en software CAE (Computer Aided Engineering / Ingeniería Asistida por Ordenador). Siguiendo, se realizan las simulaciones respectivas de los sistemas del proceso, lo cual permite establecer de forma adecuada cada uno de los elementos de control de la máquina.

Tras la finalización de los procesos de diseño estructural y control, en secuencia se analizará el funcionamiento mecánico y de control del sistema, determinando características y mejoras.



Figura 27. Metodología de Diseño mecatrónico.

CAPÍTULO III – Resultados y discusión

Este capítulo se compone por dos apartados, uno relacionado con el proceso para la obtención de la fibra y celulosa y el otro de cómo a partir de esa ruta se obtienen los requerimientos para el diseño del prototipo para la conformación de papel orgánico.

3.1. Síntesis y procesamiento de celulosa

Vale destacar que, con base en la revisión previa, ya se ha establecido que como métodos convencionales para la obtención de celulosa se usan en combinación dos rutas, denominadas, hidrólisis alcalina e hidrólisis ácida.

Como visto previamente, del proceso de adecuación de la materia prima se obtiene un material pastoso que contiene fibras cortas, pero el cual aún contiene lignina y hemicelulosa, los cuales son elementos que se prescinden en la elaboración de papel y obtención de celulosa, por lo cual se usan tratamientos para limpiar el material y reducir el tamaño de las fibras.

En primera instancia, el material licuado y secado a 40°C por 48 horas, se sometió a caracterización morfológica por medio de Microscopia electrónica de barrido (MEB), térmica a través de calorimetría diferencial (DSC) y termogravimetría (TG), y estructural por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

La figura 28, presenta la imagen de un paquete de fibras del pseudotallo de plátano sin tratamientos químicos, la cual tiene un diámetro aproximado de 200 μm .

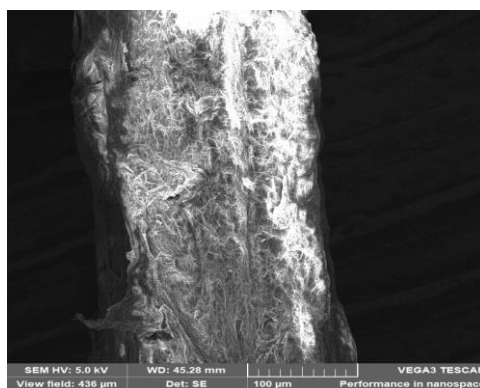


Figura 28. Imagen de MEB de una fibra del pseudotallo de plátano sin tratamiento.

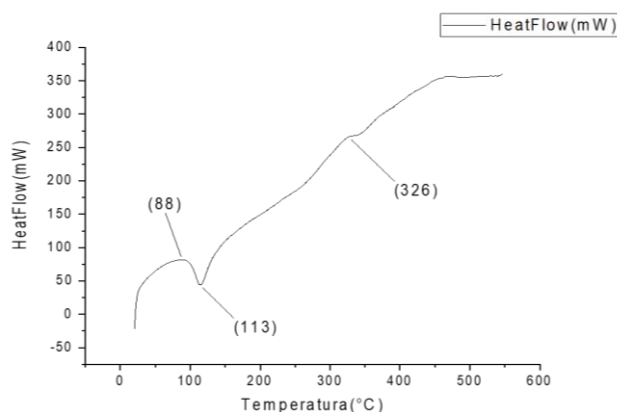


Figura 29. Calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la muestra sin tratamiento.

El análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la muestra de fibra de pseudotallo, figura 29, muestra un pico endotérmico centrado en 113°C, iniciando alrededor de 88°C y extendiéndose hasta 150°C aproximadamente, el cual es asociado a la evaporación de agua presente en las fibras. Además, se observa un pico exotérmico alrededor de 326° C donde se presenta la descarboxilación y despolimerización de la celulosa, junto con la pirólisis del material [88].

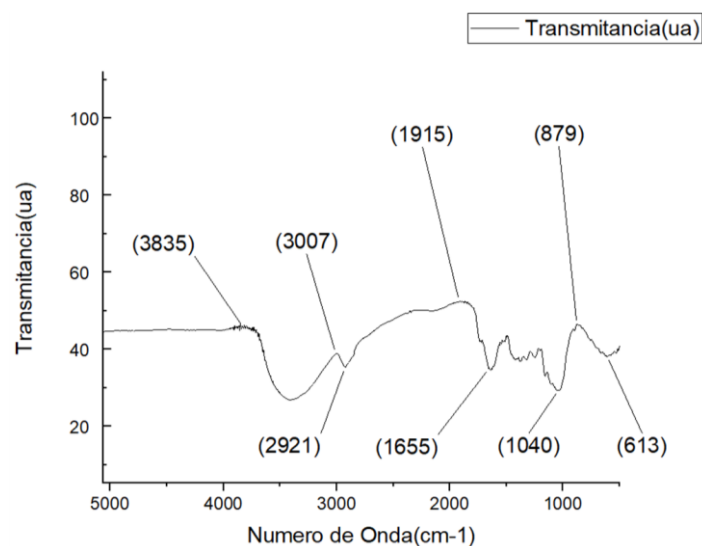


Figura 30. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para la muestra sin tratamiento.

En la figura 30, espectro FTIR del material virgen, se destaca una banda en el intervalo 3835-3428 cm^{-1} típica de la tensión OH de los puentes de hidrógeno intermoleculares [89]. En la región entre 3007-2900 cm^{-1} , se destaca el estiramiento de los grupos CH presentes en la celulosa y hemicelulosa [90]. Con base en la literatura entre 1915 y 1700 cm^{-1} se presentan las vibraciones de los grupos C-O-C del anillo de la β -glucopiranososa que constituye a la celulosa [89]. Adicionalmente, se presenta una banda cerca de 1655 asociado a la flexión de los enlaces O-H del agua absorbida. característicos de la lignina [92], [93].

A continuación, se presenta la relación de frecuencias asignadas al tipo de mecanismo con base en datos de la literatura.

Tabla VIII. Asignación de bandas del espectro FTIR.

Frecuencia [cm^{-1}]	Característica	Referencia
1030	Deformación aromática del plano C-H para el alcohol primario en la lignina	[94], [89]
1505-1525	Reducción del contenido de lignina	[95], [99]
1730	Eliminación del grupo acetilo presente en la hemicelulosa	[95],[98], [99]
3300-3500	Vibración axial de los hidroxilos de la celulosa	[96], [97].

Con base en los análisis previos, se evidencia que el material de estudio *Musa × paradisiaca*, puede ser considerado un residuo lignocelulósico, apto para el aislamiento de celulosa con perspectivas de ser usado en la elaboración de papel.

Así, este material se toma como punto de partida para el tratamiento a seguir, donde se considera la adecuación de fibras y aislamiento de celulosa para el conformado de papel.

3.1.1. Tratamiento de las fibras de pseudotallo

Vale destacar que inicialmente el proceso de tratamiento de las fibras, que incluye lavado y secado, se realizó de forma artesanal, sin embargo, para tener más control de las variables y hacer más efectivo el proceso, se procedió a usar un biorreactor básico en las instalaciones de Tecnoparque SENA.

Así, para el primer proceso se adicionaron 10 L de agua a 600 gramos de pseudotallo licuado en el biorreactor, el cual fue acondicionado para trabajar con una agitación aproximadamente de 400 rpm y una temperatura de 40°C, por un periodo de una hora, tal como se muestra en la figura 31.



Figura 31. Tratamiento de las fibras de pseudotallo en el biorreactor.

En este proceso, tras el paso del tiempo se limpia de forma parcial de ceras, pectinas y lignina presentes en el material. Para ello se hace cambio de agua cada tres horas, siendo que, en cada lavado se puede observar notoriamente la disminución de lignina, a través de la coloración del agua residual del proceso que se tiene en los recipientes después de los lavados (Ver figura 32).



Figura 32. Lavado de las fibras, evidenciando la disminución de lignina por la coloración del agua residual.

A continuación, se hace uso de filtros de papel con el fin de extraer la mayor cantidad de material y poder ser usado en el siguiente proceso, ver figura 33. En este caso se usaron filtros de papel Whatman 105 que permiten una retención típica de partículas en el líquido de alrededor de 25 μm .

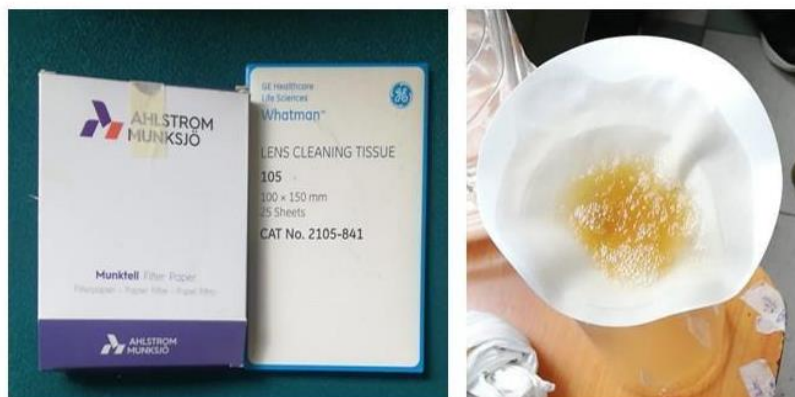


Figura 33. Proceso de filtrado del material de estudio.

Debido a la agitación del material en agua se presenta humedad en el mismo al momento de ser filtrado, para ello se usa un horno en el cual se deja el material a una temperatura de 40°C por un periodo de 3 horas.

Estos procesos conllevan tiempos de reposo, también llamados tiempos muertos, debido a que tras el proceso de lavado hay que filtrar las veces que se crea necesario, para lo cual al secar el material se necesita una temperatura constante sin maltratarlo.

A partir de este proceso se inician rutas de tratamiento con reactivos químicos, con una menor cantidad del material para su experimentación.

3.1.2. Procesos de hidrólisis de las fibras de pseudotallo del plátano

3.1.2.1. Hidrólisis alcalina

Para este proceso se usan dos reactivos, NaOH y H_2O_2 , Hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno, respectivamente.

3.1.2.1.1. Agitación en hidróxido de sodio

Aquí 1.5 gr del material se coloca en un beaker al cual es adicionada una solución de NaOH al 5% y sometido a agitación magnética a 600 r.p.m, por un periodo de dos horas ajustando la temperatura a 60°C. Pasado este tiempo se puede observar una pigmentación oscura en el beaker (ver figura 34, a). A continuación, este material se filtra, hasta obtener pH neutro y se seca en el horno a 40°C durante 2 horas. De esta forma aún se puede notar la pigmentación de lignina en el material durante la agitación y el posterior paso por el horno como se muestra en la figura 34(b).

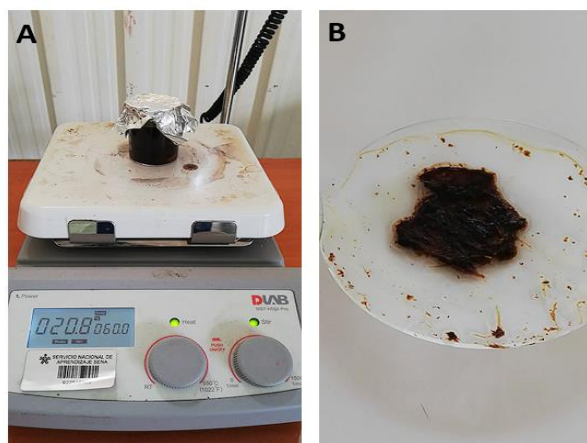


Figura 34. Hidrólisis alcalina en NaOH al 5%.

3.1.2.1.2. Agitación en Peróxido de hidrógeno

Aquí 1.5 gr del material se coloca en un beaker al cual es adicionada una solución de H_2O_2 al 10% y sometido a agitación magnética a 600 r.p.m, ajustando la temperatura a 60°C. Este proceso se lleva a cabo por un periodo de dos horas. La figura 35, presenta el proceso de agitación del material, el lavado/filtrado hasta obtener pH neutro y finalmente el material después de secado en horno a 40°C durante 2 horas. Se puede notar aquí la eficiencia en la eliminación de lignina durante la agitación y el posterior paso por el filtro, dada la coloración final del material.

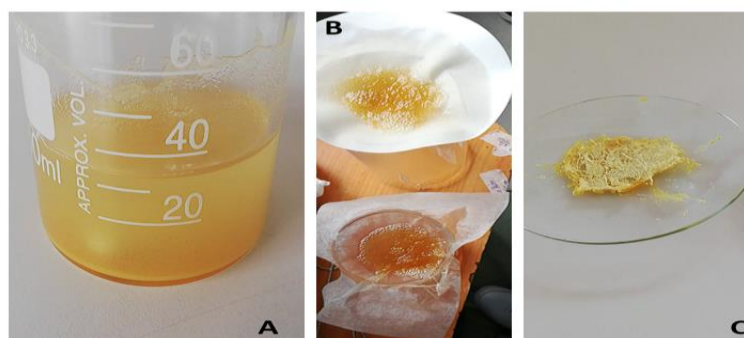


Figura 35. Hidrólisis alcalina con H2O2 al 10%.

Estos dos procesos los cuales fueron los primeros en experimentar, funcionaron como guías en la búsqueda del material al que se quiere llegar, siendo que se busca una ruta amigable con un material que sea biodegradable. Debido a estos dos procesos de agitación se destaca que el hidróxido de sodio actúa inmediatamente ya que libera la lignina de las fibras como se puede observar el color de la figura 34, observando así un material viscoso y con tintura como se puede ver en la figura 34b. También se observa que el proceso con peróxido de hidrógeno es el mejor compuesto para tratar la fibra, tal como se hace en la industria papelera y como se evidencia en la figura 35a, donde se nota un material más claro al momento del secado (Ver figura 35c).

3.1.2.1.3. Agitación en Peróxido de hidrógeno e hidróxido de sodio

Para la mezcla de estos materiales se hacen dos procesos con base en procesos de la investigación reportados en la literatura [100]. Una vez se hace la limpieza con NaOH al 5%(Ver figura 36, A), se filtra y seca (Figura 36, B y C), el siguiente paso es la mezcla de reactivos; así, se toman 1.5 gr del material y se colocan en un beaker al cual es adicionada

una solución de NaOH al 5% y H_2O_2 al 10% en una relación 1 a 2 respectivamente. El proceso es realizado sobre agitación magnética a 300 r.p.m, por un periodo de una hora, ajustando la temperatura a 60°C. Este material se filtra hasta obtener pH neutro, como se puede evidenciar en la figura 37 y se deja secar en el horno a 30°C por un periodo de dos horas. De forma general se aprecia la reducción de lignina durante el proceso, por el cambio de coloración del material, como se observa en la figura 37.

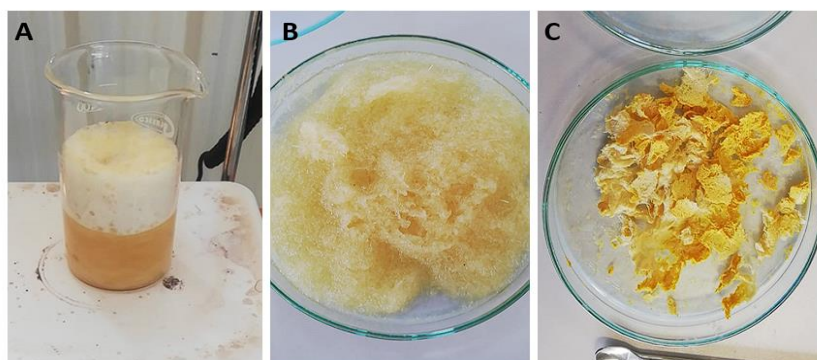


Figura 36. Hidrólisis alcalina en NaOH al 5%.



Figura 37. Hidrólisis alcalina en NaOH al 5% + H_2O_2 al 10%.

3.1.2.2. Caracterización morfológica, estructural y térmica de la hidrólisis alcalina

3.1.2.2.1. Microscopía electrónica de barrido

La figura 38, presenta la imagen del tratamiento de fibras del pseudotallo de plátano usando hidróxido de sodio (NaOH), donde se observa una microfibrilla con superficie rugosa y un diámetro aproximado de 15 μm . Vale la pena destacar como referencia que la fibra del pseudotallo, sin ningún tratamiento tenía un diámetro inicial aproximado de 200 μm (Figura 28). Así, este proceso muestra la descomposición externa de la lignina y hemicelulosa de las fibras como efecto del proceso de hidrólisis alcalina [101], [102].

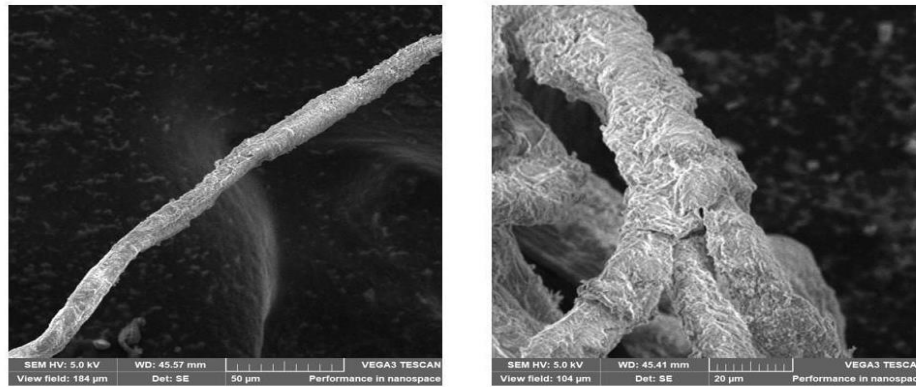


Figura 38. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis con hidróxido de sodio (5%) .

La figura 39, presenta la imagen del tratamiento de fibras del pseudotallo de plátano usando peróxido de hidrógeno (Concentración de 10%), donde se observan cadenas de microfibras de diversos diámetros, siendo estimados valores de aproximadamente 2 µm para las más finas y de 10 µm para las más gruesas.

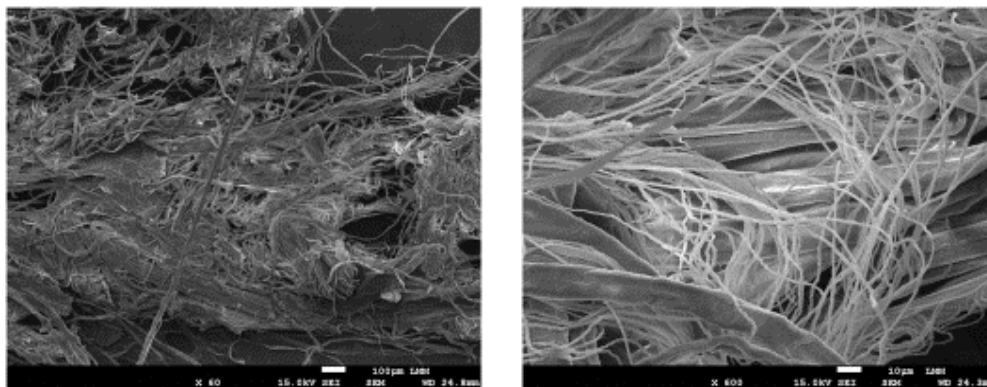


Figura 39. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis con peróxido de hidrógeno (10%).

La figura 40, presenta la imagen del primer tratamiento de fibras del pseudotallo de plátano usando hidróxido de sodio (5%), donde en la figura 40B se observa un paquete de microfibras siendo estimado un diámetro de 18 µm para la fibra individual, como se muestra en la figura 40A.

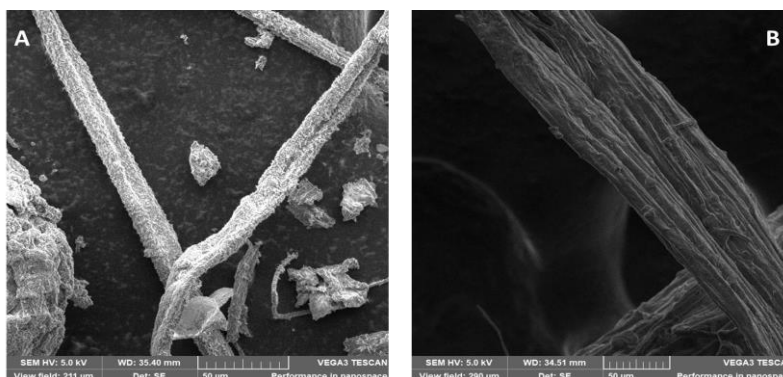


Figura 40. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis en hidróxido de sodio (NaOH 5%).

La figura 41 muestra el pseudotallo de plátano después de hidrólisis con una combinación de peróxido de hidrógeno e hidróxido de sodio (proporción 2:1), en general es una estructura

compacta con algunas fibras sueltas. A su vez las fibras presentes en el material tienen un diámetro aproximado de 5 μm como se observa en la figura 41.

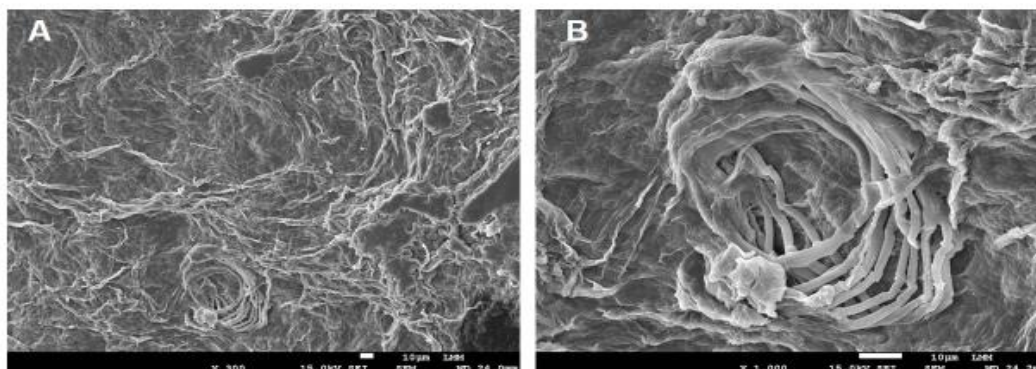


Figura 41. Micrografía de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis con una combinación de peróxido de hidrógeno e hidróxido de sodio (proporción 2:1).

Vale destacar, que pese a que la coloración cambio con cada uno de los tratamientos como resultado de la eliminación de hemicelulosa y lignina, además del evidente aislamiento de las fibras después de los procesos de hidrólisis alcalina, es reportado en la literatura que las microfibras aún pueden contener residuos de estos compuestos en las paredes alrededor de las fibras [102].

3.1.2.2.2. Calorimetría diferencial de barrido

A seguir se presentan los resultados de calorimetría diferencial (DSC) que representan una gráfica correspondiente al flujo de calor en función de la temperatura de calentamiento (ejes X,Y. respectivamente).

En los termogramas de DSC que se muestran en la figura 42 se pueden observar picos endotérmicos en el intervalo 80 °C a 100 °C asociado a la evaporación de agua [88]. Cabe destacar que Herrera, Sinche & Bonilla, destacan un pico endotérmico entre 330.5° C y 357.4°C observado para la celulosa comercial [103], siendo que para el material de estudio este se observa a 360°C(A), 361°C(B) y 345°C(C), el cual es atribuido a la celulosa. El último pico endotérmico se da a una temperatura superior a 400°C, los cuales se refieren a la degradación de celulosa tipo α -celulosa y la constitución de l-celulosa según la caracterización de celulosa de Musa paradisiaca [104].

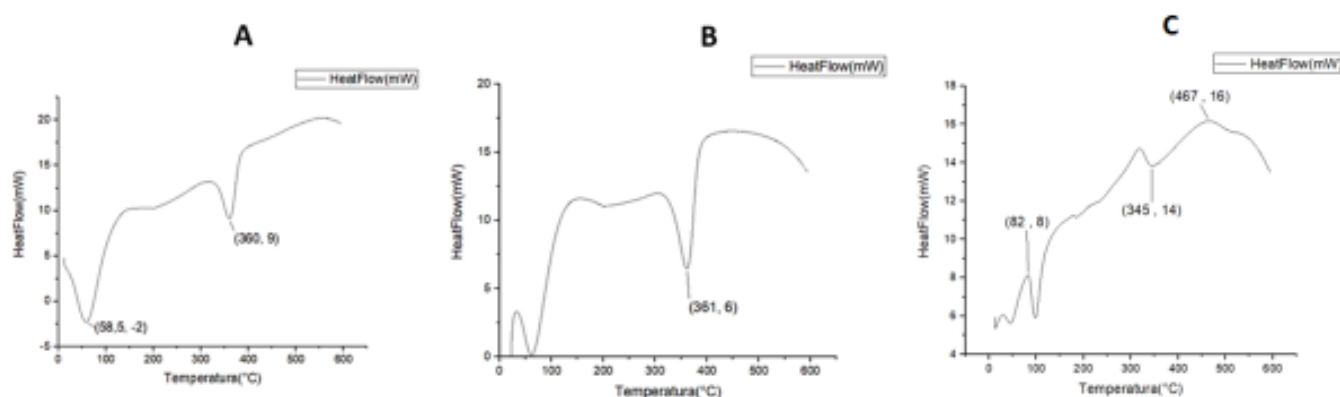


Figura 42. Termograma DSC de las muestras tratadas con (A) Hidróxido de Sodio (NaOH) y (B) Peroxido de Hidrogeno (H_2O_2), (C) Hidróxido de Sodio y Peróxido de Hidrógeno

Morán y colaboradores, afirman que cuando la temperatura aumenta por encima de 200 °C se muestran los picos endotérmicos para fases cristalinas de los biopolímeros lignocelulósicos [89].

Se puede añadir que la temperatura de transición vítrea y la temperatura de fusión se pueden presentar entre 180 y 240°C, respectivamente y picos alrededor de 350°C se asocian con las reacciones de descomposición y despolimerización de la celulosa [105]. También que cuando un pico endotérmico se traslada a una temperatura mucho más baja para las fibras tratadas, se puede decir que su descomposición requiere menos energía [106].

3.1.2.2.3. Análisis Termogravimétrico

El TGA es una técnica de análisis destructiva que mide la pérdida de masa de un material con respecto a la temperatura a diferentes atmósferas [107]. Este análisis permite medir la cantidad y la velocidad de cambio de la masa de un material como función de la temperatura o tiempo en una atmósfera controlada, dichas medidas son utilizadas para predecir su estabilidad térmica a temperaturas hasta de 1000°C [108].

De forma general es reportado que, a una temperatura inferior a 200°C, ocurre una pérdida de masa que se atribuye al proceso de deshidratación. En el intervalo entre 200 a 380°C, tiene lugar la pirolisis de hemicelulosa y celulosa, a temperaturas superiores a los 380°C, también ocurre pirolisis de la celulosa y de la lignina, a temperaturas superiores a 560°C, se aprecia una de pérdida de peso más constante, la cual está asociada a la carbonización del material [109].

Las figuras 43 a 45 muestran la curva de TGA/DTGA para los tratamientos alcalinos del pseudotallo de plátano.

3.1.2.2.3.1. Muestra tratada con hidróxido de sodio NaOH.

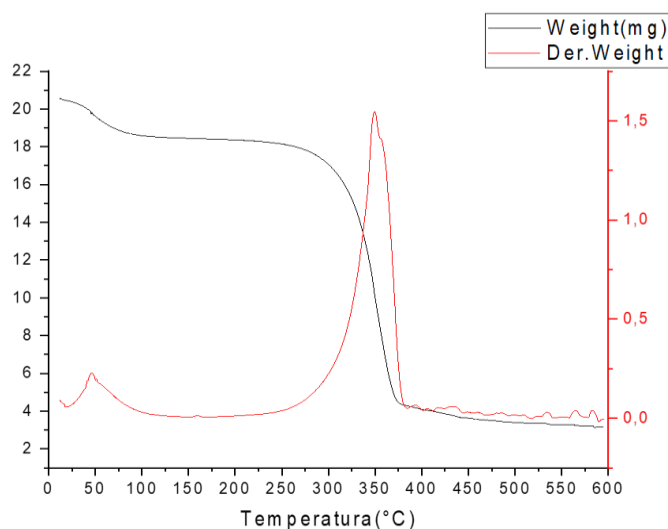


Figura 43. TGA de la muestra tratada con NaOH al 5 %.

Para la muestra de la figura 43 se tiene inicialmente una masa de 20.6 mg, el primer cambio de masa por eliminación del agua se produce en la región entre 50°C y 160°C con una pérdida de masa de 12.6%. En la literatura es reportado que este proceso se debe a la evaporación de la humedad y liberación del agua absorbida en la fibra [94].

En la región entre 200°C a 370° C, la hemicelulosa se despolimeriza y los enlaces glicosídicos de la celulosa se rompen [110]. En la gráfica (Ver figura 43), se puede observar que superado los 350°C se obtiene una masa de 4.6 mg. Que dado la masa inicial reporta una pérdida del 65.01%. La degradación residual de lignina tuvo lugar entre 400 y 600 ° C donde se presenta

un cambio de masa del 14.56% para una masa resultante de 3 mg. Estudios con borra de café, semillas de algodón y hojas de caqui [111] muestra resultados semejantes.

3.1.2.2.3.2. Muestra tratada con peróxido de hidrógeno H₂O₂

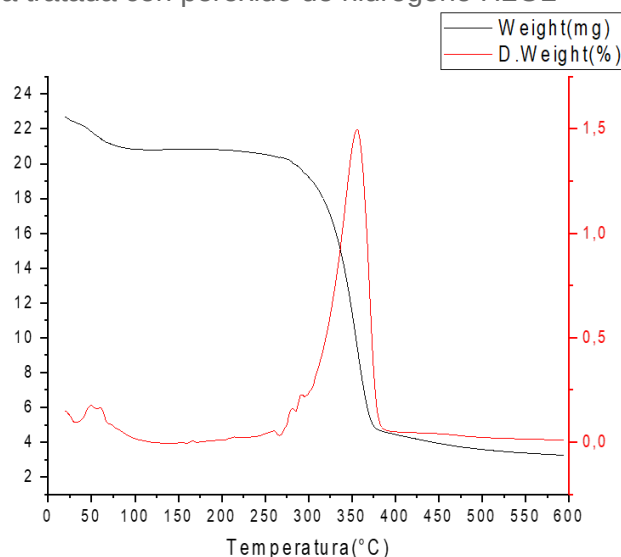


Figura 44. TGA de la muestra tratada con H₂O₂ al 10%.

En la curva de TGA (Figura 44) se tiene inicialmente una masa de 22.7 mg, el primer cambio de masa por eliminación del agua que se produce en la región entre 50°C y 160°C [112] con una pérdida de masa de 11.84%. También se puede observar alrededor de 350°C una masa de 5 mg debido a la degradación de la hemicelulosa que con respecto a la masa inicial reporta una pérdida del 78%. Por último, las cadenas que componen la lignina se descomponen a una temperatura superior a 500°C [113]. A los 600°C se presenta una masa final de 3 mg para un porcentaje residual de la masa inicial de 13.22%.

3.1.2.2.3.3. Muestra Peróxido de hidrógeno tratada con hidróxido de sodio H₂O₂-NaOH proporción:(2-1)

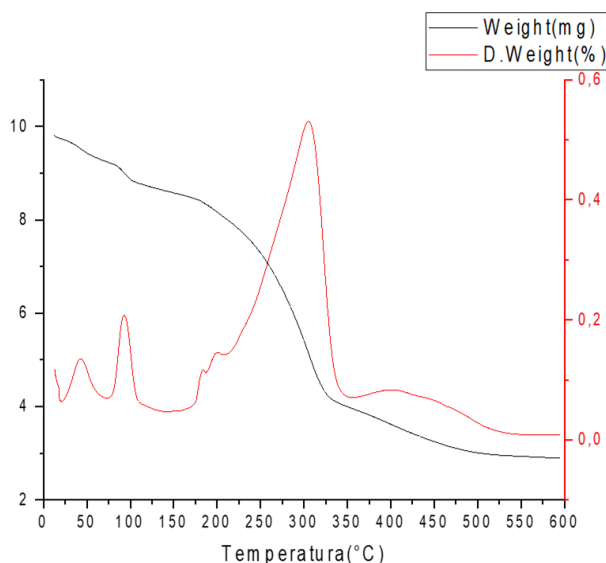


Figura 45. TGA de la muestra tratada con H₂O₂-NaOH en una proporción 2:1.

En esta muestra (Figura 45), se tiene una masa inicial de 9.7 mg, se puede observar un material más estable en deshidratación y degradación (Figura 37), empezando este proceso de la pérdida de humedad a los 18°C donde se pierde el 11.44% de masa. El material empieza

a degradarse superando los 140°C y en 330°C se tiene una masa de 4 mg para un restante del 41.24% de masa. Por último, se evidencia un cuarto pico superados los 400°C, que corresponde con el rompimiento de las cadenas que constituyen la lignina [113] y resulta una masa de 2.9 mg, evidenciando un residuo de 29.9%.

Para comparar los resultados que se obtienen, se muestran los porcentajes de pérdida de masa con relación a la temperatura (Ver Tabla IX). Para ello de la literatura se obtienen los siguientes intervalos: en la región de 50-120 °C se da principalmente a la evaporación de la humedad; es decir, la liberación del agua absorbida en las fibras. En la región de 220°C a 300°C, la hemicelulosa se despolimeriza y se rompen los enlaces glicosídicos de la celulosa. En la región de 200°C a 400°C se refiere a la degradación de la celulosa; la lignina tiene lugar entre 450°C y 700°C. [114]

Tabla IX. Asignación de picos térmicos y porcentajes de masa.

Proceso	Componentes	Picos de Temperatura(°C)	Pérdida de masa (%)	Residuo del material (%)
NaOH al 5 %	Hemicelulosa Celulosa Lignina	263.4 ± 0.3 375.3 ± 0.6 537.2 ± 0.5	12.6 ± 0.3 77.6 ± 0.7 85.4 ± 1	14.56
H2O2 al 10%	Hemicelulosa Celulosa Lignina	267.5 ± 0.5 378.4 ± 1 514.6 ± 0.2	11.8 ± 0.7 77.9 ± 0.3 86.7 ± 0.5	13.22
H2O2-NaOH (2:1)	Hemicelulosa Celulosa Lignina	239.2 ± 1 340.6 ± 0.8 535.8 ± 0.3	22.6 ± 0.2 58.7 ± 0.8 70.0 ± 0.1	29.9

Los resultados obtenidos mediante TGA y el análisis por DSC están en concordancia con la investigación literaria. Para las muestras estudiadas este tipo de fibras tienen la ventaja de tener una cantidad de lignina que permite obtener mejores resultados en la fabricación de pulpa y papel evitando extraer este compuesto mediante procesos químicos agresivos.

Según este análisis químico se puede decir que el pseudotallo contiene un porcentaje muy alto en hemicelulosa como lo observó [115], por el alto contenido en fibras lignocelulósicas. Por esta razón como se puede apreciar en las gráficas picos relacionados a la celulosa y hemicelulosa con un porcentaje mayor.

3.1.2.2.4. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Para la caracterización química, se usa el estudio FTIR, para identificar grupos funcionales de las muestras y el cambio en la estructura de fibra celulosa a través del proceso por hidrólisis alcalina.

El análisis se basa en las vibraciones de cada tratamiento, se puede definir zonas características para los diferentes grupos funcionales de la celulosa, por ejemplo [91], muestra que en el intervalo 3300 - 3400 cm⁻¹ se da el estiramiento de los grupos O-H, característico de la celulosa.

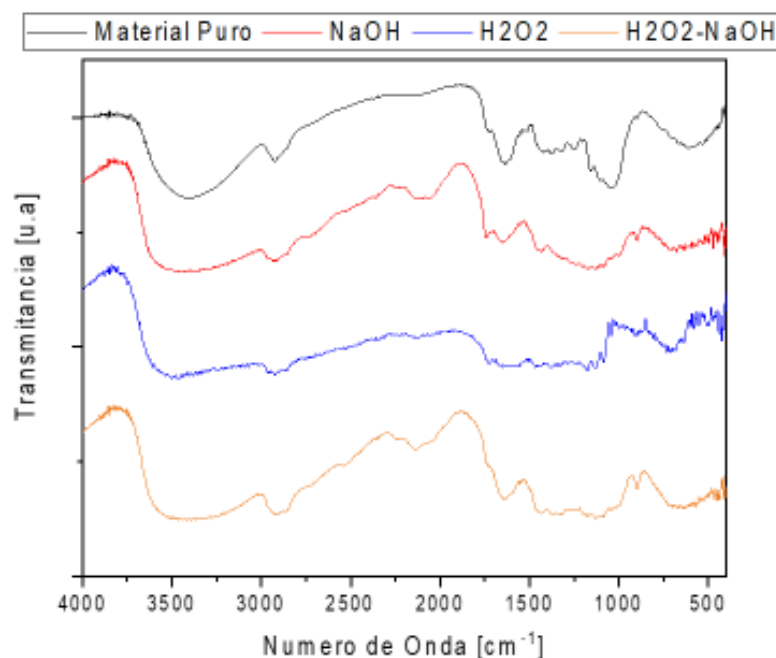


Figura 46. Espectros de FTIR de las muestras tratadas con hidrólisis alcalina.

En la figura 46 se pueden observar detalladamente los espectros para cada una de las muestras, destacando entre ellas la disminución de vibraciones que se notan en los tratamientos, las bandas que se encuentran entre 3500 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} para el espectro de la celulosa [116], presente en todos los tratamientos se observa una curva desde los 3000 cm^{-1} hasta los 3800 cm^{-1} . Para el estiramiento perteneciente al grupo O-H en cuál es creciente en los tratamientos alcalinos con respecto al material sin tratamiento para una celulosa tipo I-beta [103]. Cercano a 2900 cm^{-1} resalta una banda debido al estiramiento de los grupos C-H designados para la celulosa [90]. En el intervalo 1600 y 1800 cm^{-1} se puede notar el grupo C-O característico para las vibraciones de hemicelulosa [92]. En la figura 46, alrededor del 1700 cm^{-1} una banda la cual se reduce significativamente en el proceso con peróxido de hidrógeno, identificando una disminución en la cetona presente en la hemicelulosa [93]. La lignina se muestra en el espectro en diferentes regiones, cerca de 2800 y 1500 cm^{-1} [93], para los anillos aromáticos de la lignina, el grupo metoxil [90] y el alcohol primario de la lignina cerca a los 1000 cm^{-1} [91]. Se puede notar una disminución de estas vibraciones en los tratamientos. A 850 cm^{-1} se tiene la vibración del grupo del carbono anomérico de carbohidrato, C1-H, y en 1630 cm^{-1} la banda correspondiente a agua adsorbida similar a los datos obtenidos en [117]. Las bandas que se presentan dan como resultado la obtención de un mayor porcentaje de celulosa al ser tratadas las fibras, también que la absorción de agua del material es alta por la región comprendida entre 800 y 1500 cm^{-1} y el tratamiento con mayor reducción de lignina y hemicelulosa es el peróxido de hidrógeno.

3.1.2.3. Hidrólisis ácida

Para este proceso se usan reactivos, tales como, ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) con base en el trabajo realizado por Tarchoun, Trache y colaboradores [118], donde se especifica una combinación de ácidos, tales como HCl y HNO_3 a fin tornar la ruta un poco menos agresiva con el medio ambiente.

Para los siguientes procesos la fibra fue lavada previamente en agua destilada y secada en el horno a 30°C por 24 horas. Sometida a tratamiento alcalino NaOH al 5%, filtrada hasta que se encuentre en un pH neutro, segundo lavado alcalino en NaOH (Hidróxido de sodio al 5%)

más H_2O_2 (peróxido de hidrógeno al 10%) y se deja en el horno por un periodo de 2 horas. Este será el material de partida para los procesos de la ruta ácida (Ver figura 47).



Figura 47. Fibra de pseudotallo, lavada en agua destilada y tratamiento alcalino con pH neutro y secado en horno tipo mufla.

3.1.2.3.1. Agitación en ácido clorhídrico

Se toman 2 gr del material de partida y se coloca en un beaker al cual es adicionada una solución de ácido clorhídrico (HCl) a 2.5M y sometido a agitación magnética a 600 r.p.m, por un periodo de una hora ajustando la temperatura a 30°C. Este material se lava/filtra, hasta obtener pH neutro, y se deja secar en el horno a 40°C. Se puede notar la reducción de hemicelulosa y lignina residual, por lo cual toma una pigmentación marrón durante el lavado. En la figura 48 se puede observar el material, después de filtrado y secado dispuesto sobre una placa Petri.



Figura 48. Hidrólisis Ácida con ácido clorhídrico (2.5 M).

3.1.2.3.2. Agitación en Ácido Nítrico

Aquí 1.5 gr del material de partida y se coloca en un beaker al cual es adicionada una solución de HNO_3 a 2.5M y sometido a agitación magnética a 600 r.p.m, por un periodo de una hora ajustando la temperatura a 30°C. Tras su paso por los filtros de papel, este material se deja secar en el horno a 30°C. Se puede notar la eliminación del restante de lignina durante la agitación, por la coloración tomada. El posterior paso es el filtrado y secado, donde se observa una compactación de fibras por la eliminación de la humedad (ver figura 49).



Figura 49. Agitación en Ácido Nítrico (2.5 M).

3.1.2.3.3. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Nítrico

Para el primer proceso se toma 2 gr del material se coloca en un beaker y se adiciona una solución de HCl (2.5M) y HNO_3 (2.5M), con proporción 1 a 2 respectivamente. Este sistema es sometido a agitación magnética a 600 r.p.m, por un periodo de una hora ajustando la temperatura a $20^{\circ}C$. Este material se deja secar en el horno a $30^{\circ}C$. Se puede observar en la figura 50 la reducción de lignina y hemicelulosa por lo cual se obtiene un material en forma de granos no uniformes con una tonalidad más blanca.



Figura 50. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Nítrico proporción 1 a 2.

En el segundo, paso se invierte la proporción de los ácidos, siendo este ahora 2 a 1 de HCl (2.5M) y HNO_3 (2.5M) respectivamente, las demás condiciones se mantienen constantes. Este material después de filtrado y secado presenta una tonalidad un poco amarilla por lo que se asume que aún se tiene presencia de lignina (Ver figura 51).



Figura 51. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Nítrico proporción 2 a 1.

3.1.2.3.4. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Sulfúrico

Aquí 1.5 gr del material se coloca en un beaker al cual es adicionada una solución de HCL y H_2SO_4 (2.5M) y proporción 2 a 1 respectivamente, sometido a agitación magnética a 600 r.p.m, por un periodo de una hora ajustando la temperatura a 30°C. Pasado este tiempo se puede observar en el beaker (ver figura 52) que el proceso ácido actúa rápidamente en la obtención de celulosa, este material se filtra y se deja en el horno a 40°C. Se puede notar la eliminación de lignina y hemicelulosa durante la agitación y el posterior paso por el horno como se muestra en la figura 52B, donde no hay pigmentación en el material y toma una forma alargada sin grumos.

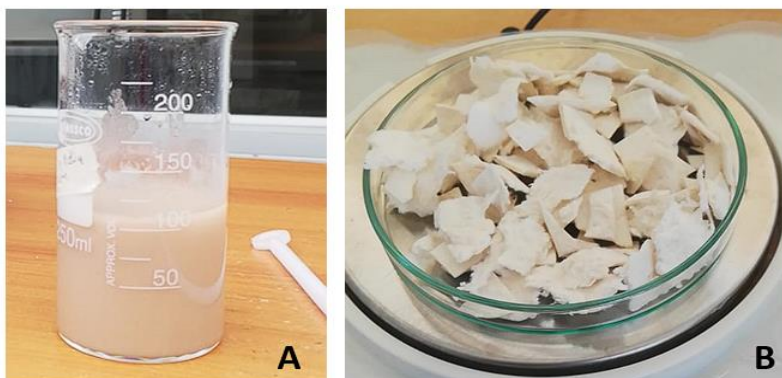


Figura 52. Agitación en Ácido Clorhídrico y Ácido Sulfúrico proporción 2 a 1.

3.1.2.4. Caracterización morfológica, estructural y térmica de la hidrólisis ácida

3.1.2.4.1. Microscopía electrónica de barrido

La figura 53, muestra las microestructuras de las muestras después de ser tratadas con los diferentes ácidos.

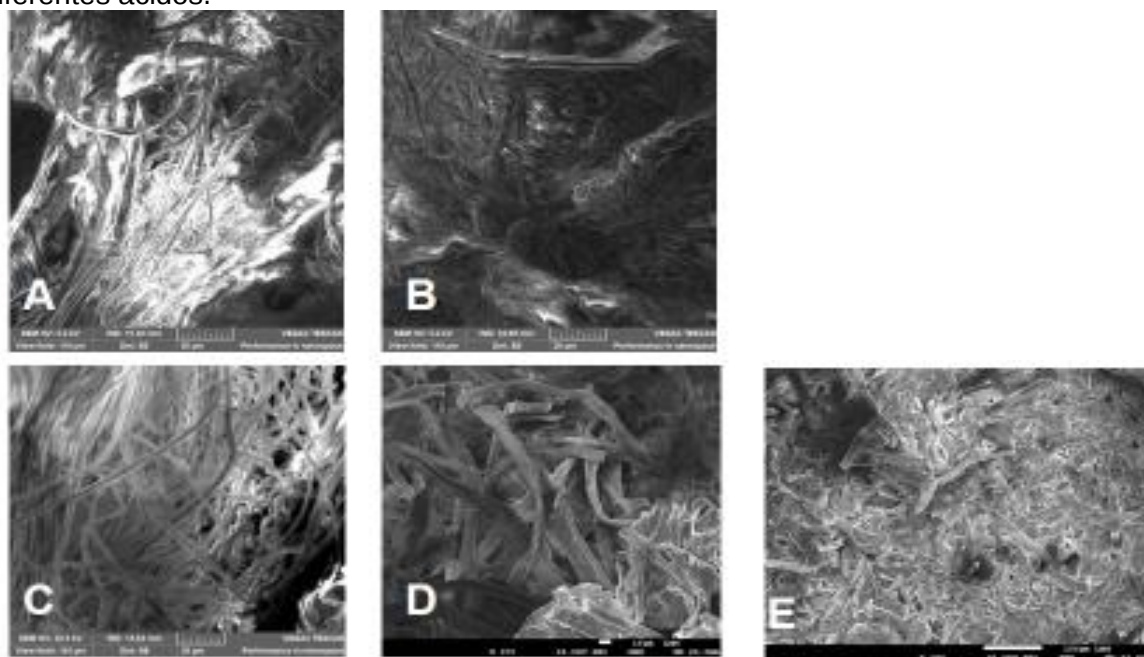


Figura 53. Micrografías de fibras del pseudotallo de plátano después de hidrólisis ácida con (a) HCl, (b) HNO₃, (c) HCl + HNO₃ (1:2), (d) HCl + HNO₃(2:1) y (e) HCl + H₂SO₄ (2:1).

De forma general, se pueden observar paquetes de fibras en las muestras tratadas con ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO_3), siendo que estas fibras no están dispuestas de forma compacta y su superficie es aparentemente suave. Se estima que el diámetro promedio de las fibras es de 10 μm y 7 μm para los tratamientos con HCl y HNO_3 , respectivamente (ver figuras 53 a y b).

Las figuras 53c a 53e, presenta las imágenes del tratamiento de fibras del pseudotallo de plátano usando HCl en combinación HNO_3 y H_2SO_4 , siendo observado en general una estructura más compacta de las microfibras, siendo estimados diámetros de 10 μm para la fibra individual con una superficie suave. Como referencia de comparación, vale destacar que las fibras inicialmente tenían un diámetro de entre 50 y 200 μm , por lo que es evidente el efecto de los ataques químicos (ruta alcalina + ruta ácida) sobre el espesor de estas para la eliminación de la hemicelulosa y la lignina

3.1.2.4.2. Calorimetría diferencial de barrido

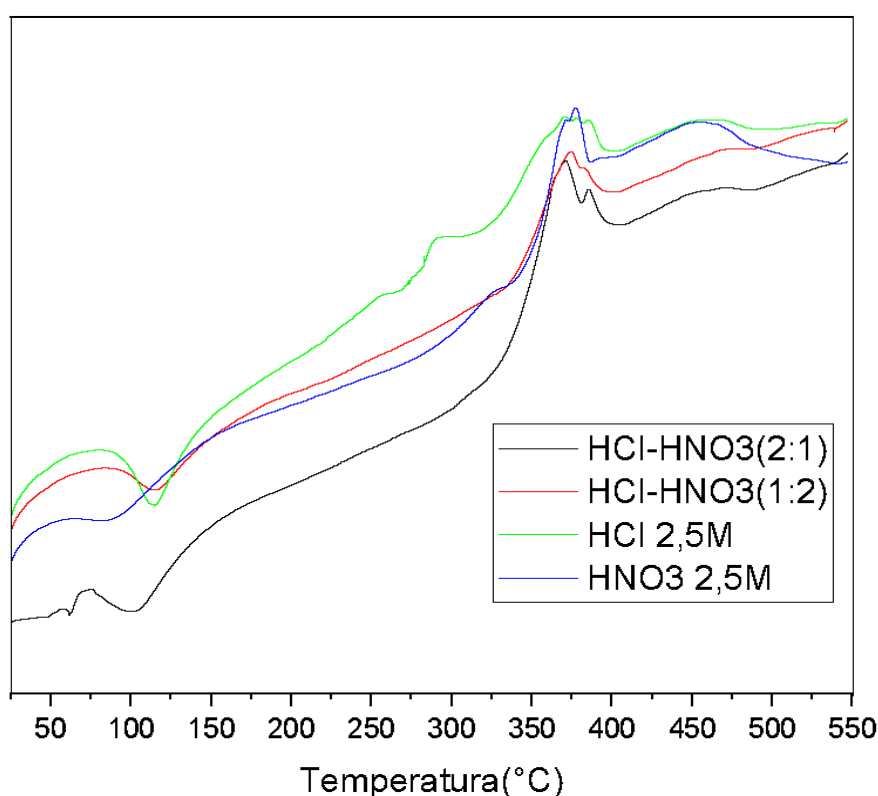


Figura 54. Muestras DSC de los procesos ácidos.

Para todas las muestras se observa que, el agua evaporó alrededor de 100-150 $^{\circ}\text{C}$, la hemicelulosa alrededor de 240-345 $^{\circ}\text{C}$, y la celulosa se descompuso alrededor de 290-375 $^{\circ}\text{C}$, como se pudo también observar en [114]. Se puede notar que en todas las muestras con Ácido nítrico (HNO_3) no muestran una reacción significativa entre 300 y 350 $^{\circ}\text{C}$, lo cual concluye en una reducción mayor de hemicelulosa.

En la figura 54 que muestran los tratamientos con ácidos, se identifican la evaporación de agua y humedad sobrepasando los 75 $^{\circ}\text{C}$, para la solución en ácido clorhídrico se nota la formación de un hombro a 290 $^{\circ}\text{C}$ correspondiente a la flexión (deformación del material) de la celulosa [119]. La hemicelulosa se compone de varios sacáridos (xilosa, manosa, glucosa, galactosa, etc.) dispuestos en una estructura amorfa aleatoria y ramificada; que evolucionan a bajas temperaturas. La celulosa está formada por largos polímeros de glucosa sin ramificaciones; los cuales constituyen una estructura fuerte y ordenada de gran estabilidad térmica. La lignina está llena de anillos aromáticos y varias ramificaciones, por lo que la lignina

se degrada a más de 500-900 C [120]. Entre los 360°C y 400°C en los resultados se logra observar un pico endotérmico característico de la celulosa debido a la fusión de fases cristalinas. Encontrado también en la celulosa comercial [103].

En el intervalo de temperatura entre 360-400°C empieza a aumentar el flujo de calor, lo cual se asocia con la degradación de celulosa tipo α -celulosa y la constitución de I-celulosa según la caracterización de celulosa de Musa paradisiaca [104]. A esta temperatura se notan reacciones exotérmicas para la mayoría de muestras y un pico endotérmico para la muestra adicionando ácido sulfúrico, lo que se asigna a la pirólisis de la celulosa, se concluye que el proceso de carbonización es exotérmico y la volatilización es endotérmica [114], así entonces el proceso con ácido sulfúrico podría tener una reacción volátil a altas temperaturas.

3.1.2.4.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

La región de interés fundamental para la caracterización de la estructura cristalina de la celulosa mediante FTIR es la de los grupos OH, en la que pueden encontrarse vibraciones de puentes de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares [121].

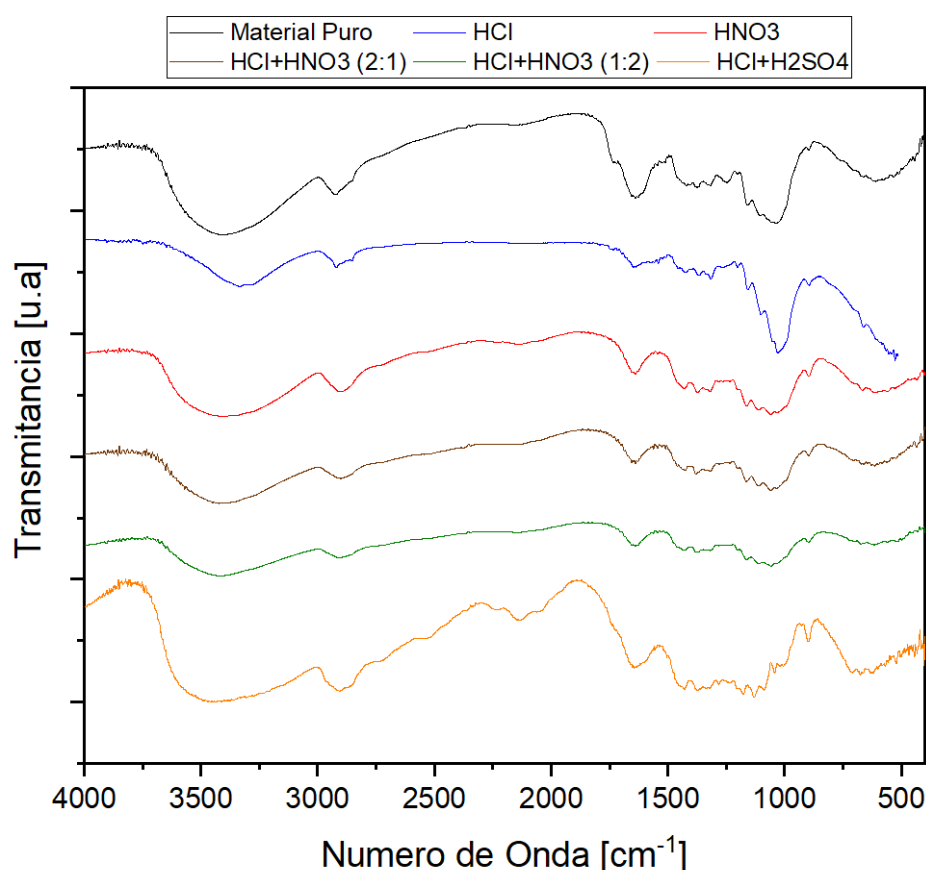


Figura 55. Muestra FTIR para los procesos con hidrólisis ácida.

El pico de absorción alrededor de 1000 cm^{-1} se atribuye a las vibraciones de los grupos C-O-C del anillo de la β -glucopiranososa que constituye a la celulosa [91]. Se presentan picos en el intervalo de 1600 - 1200 cm^{-1} correspondientes a la vibración de la estructura de los anillos aromáticos C-C característicos de la lignina [92]. Los picos de absorción entre 1600 - 1700 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de los grupos C=O presentes en la hemicelulosa. [122]. Las bandas de vibración de enlaces C-H₂, se dan aproximadamente en las regiones 2900, 1600 y 1300 cm^{-1} ; para los grupos C-O, cercanos a los 1066 cm^{-1} , Los O-H se ubican en la banda ancha entre 3900 y 3000 cm^{-1} y en 800 cm^{-1} se tiene la vibración del grupo del carbono anomérico de carbohidrato, C1-H [117].

La celulosa de esta muestra corresponde a celulosa tipo I β , debido a la presencia de bandas cercanas a 3 500 cm⁻¹ y 800 cm⁻¹, que pertenecen a vibraciones de estiramiento del enlace O-H [103]. Los picos en la región 3000 - 2700 cm⁻¹, se asocia al estiramiento de los grupos C-H presentes en la celulosa [58], [104].

De igual manera, alrededor de 1600 cm⁻¹ característico del enlace insaturado C-C de la lignina el cual disminuye cuando la muestra es sometida a tratamiento ácido, lo que permite corroborar nuevamente la remoción de lignina [90].

Las muestras presentaron señales de banda a números de onda similares a los reportados por [63], [123], lo que ratifica que los compuestos obtenidos presentan los grupos funcionales característicos de la celulosa, además se verifica que la hidrólisis ácida no modifica el tipo de celulosa, independientemente de los tiempos de hidrólisis y relaciones ácido/celulosa utilizadas [103].

En la figura 55, se puede notar la reducción de lignina hemicelulosa y celulosa con el tratamiento en HCl, El porcentaje de celulosa se mantiene en los tratamientos con ácido nítrico y ácido clorhídrico más ácido nítrico (2:1, respectivamente). Adicional a ellos se nota un aumento en la región O-H para el tratamiento con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico para un mayor porcentaje de celulosa, además en la región entre 1400 - 2000 cm⁻¹ este tratamiento presenta una mayor presencia de lignina y hemicelulosa. Se observa que los tratamientos con ácido clorhídrico más ácido nítrico en sus dos proporciones tienen características similares resaltando la reducción del hombro de la hemicelulosa en la región alrededor de 1600 cm⁻¹.

3.1.3. Compactación de muestras obtenidas.

Al término del análisis de los materiales de experimentación, estas muestras son sometidas a compactación por medio de troquel hembra-macho, así entonces se aplica el método de compactación estándar. Esto se hace con la finalidad de evaluar el material al aplicar una presión, lo cual en el resultado evidenciará la calidad de papel que se obtendría en cuanto a forma, espesor y coloración.

A continuación, se muestra el proceso por el cual se obtuvieron las muestras compactadas.



Figura 56. Proceso de compactación de material.

A continuación, se muestran los mejores resultados de compactación (Ver figura 57).



Figura 57. Mejores resultados de compactación.

3.1.4. Procesamiento de muestras para obtención de papel.

Para la elaboración de papel orgánico se hacen tres procesos para un muestreo de comparación y justificación para el desarrollo de un compactador de papel.

A continuación, se muestran tres procesos: Figura 58a agitado en H₂O, secado al aire libre y sin compactación. En la figura 58b está el proceso alcalino con la ruta de hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno, secado con tamiz y sin compactación. Por último, 58c, donde está el tratamiento con agitación en hidrólisis ácida, ácido clorhídrico y ácido nítrico, secado en horno y sin compactación.

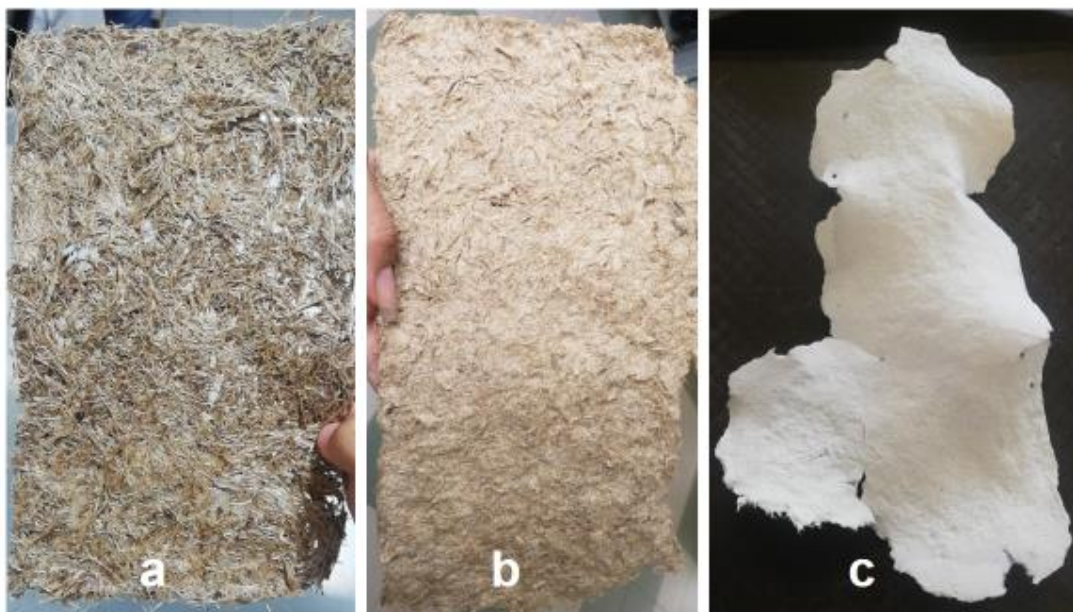


Figura 58. intentos de elaboración de hojas de papel.

Finalmente se hace una comparación, con respecto a los resultados de estos procesos, se concluye que la fibra sin tratar da como resultado una superficie rugosa, la cual contiene extrusiones y un espesor de aproximadamente 8 mm. Mientras que la muestra tratada logra una forma compacta y blanquecina parecida al papel tradicional, ver figura 58C.

3.2. Diseño del biorreactor y sistema de compactación.

En primera instancia con base en los resultados de extracción de celulosa para el conformado de papel orgánico, se evidenció que la ruta de procesamiento, después del acondicionamiento de la materia prima, debe seguir los siguientes pasos:

Lavado por medio de agitación a 400 rpm a una temperatura de 40 °C.

Secado del material a una temperatura de 30°C durante 24 horas.

Proceso alcalino, usando Hidrólisis alcalina, un primer lavado en NaOH(5%) y segundo tratamiento en H₂O₂ al 10% NaOH al 5% relación 2:1, durante 60 min a una temperatura de 60°C con agitación constante a 300 r.p.m. Filtrado y lavado del material, por lo menos 5 lavados, hasta obtener un pH neutro.

Proceso ácido, usando una combinación de HCl (2.5M) y HNO₃ (2.5M), con proporción 1 a 2 respectivamente, a una temperatura de 20°C, con agitación constante a 600 rpm durante 60 min. Filtrado y lavado del material por lo menos 3 lavados hasta obtener pH neutro.

Una vez se identifican dos procesos principales para el tratamiento de las fibras y obtención de celulosa, los cuales se basan en agitación con las características mencionadas arriba para el aislamiento de la celulosa y conformado por compactación para la fabricación de papel a partir del material obtenido, si es por medio de hidrólisis alcalina y a través de la ruta ácida. La ruta convencional usa clorito de sodio y ácido sulfúrico al 64% [129], los efluentes generados durante este proceso de blanqueamiento con dióxido de cloro (ClO₂) pueden contener compuestos orgánicos clorados, los cuales son contaminantes persistentes y pueden ser dañinos para los organismos acuáticos y el medio ambiente en general, por las reacciones entre el clorito de sodio (NaClO₂) y ácido sulfúrico (H₂SO₄). Para ello se sustituyen estos reactivos por compuestos menos agresivos como el ácido clorhídrico y el ácido nítrico en bajas concentraciones.

En este sentido, siguiendo la metodología de diseño mecatrónico, una vez identificadas las características del proceso, se procede al diseño de los sistemas, biorreactor y compactador, iniciando con sus bosquejos.

3.2.1. Dibujo a mano alzada.

Teniendo en cuenta las variables a controlar y los procesos para la obtención de papel a seguir, se presentan bosquejos del diseño inicial de los prototipos del biorreactor y el compactador (Ver figuras 59 y 60).

En el caso del biorreactor (figura 59), el diseño se basa en los biorreactores Walter Velazco 10L y el de Technal Equipos Científicos, los cuales constan principalmente de un Motor (agitador controlado), aspás, resistencia de calor, entradas para sensores (espuma, nivel y temperatura) y compuertas de muestreo.

Para el sistema compactador (figura 60), se tiene un sistema que consta de placas metálicas (inferior y superior), cilindros neumáticos, tamiz y una resistencia de calor (controlada por sensor de temperatura).

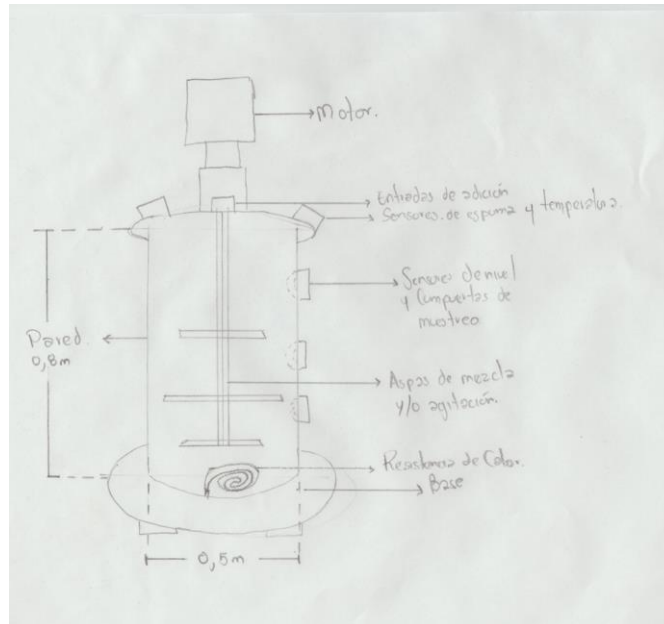


Figura 59. Bosquejo del biorreactor

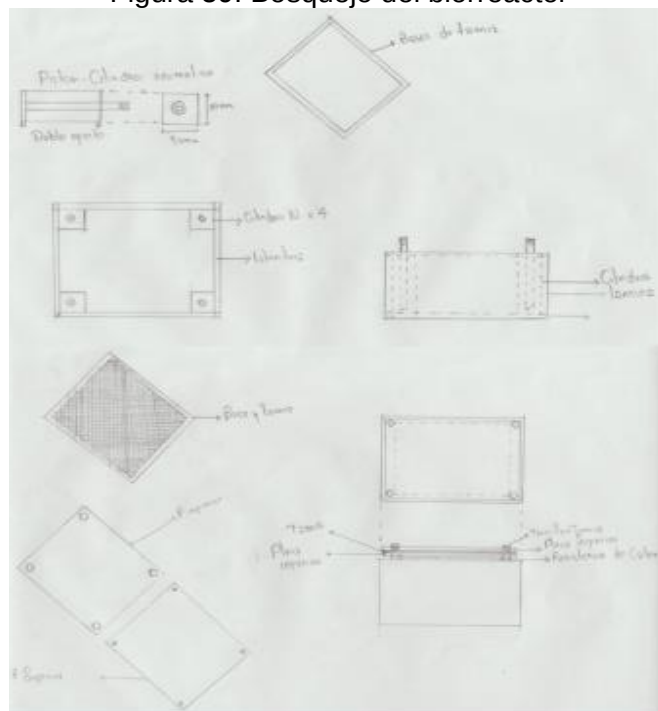


Figura 60. Bosquejo de compactador

3.2.2. Diseño CAD de los sistemas

Una vez se obtienen las características principales de los sistemas se procede a la virtualización de los elementos que componen cada uno de estos, así como a su análisis del comportamiento mecánico y estructural usando el software SOLIDWORKS. Las partes de los prototipos se describen a continuación.

3.2.2.1. Diseño del Biorreactor Batch

Se propone el diseño de un reactor ideal discontinuo tipo batch o por lotes ya que es el más eficiente en los procesos experimentales químicos como lo es la elaboración de papel,

además de que no es necesario la entrada y salida de fluidos continuamente, debido a que normalmente trabajan a condiciones de temperatura, velocidad y volumen constante. Por otro lado, el costo al construirlo será más económico en comparación con los demás tipos de reactores.

3.2.2.1.1. Cálculo para el diseño del Reactor

Para que este diseño de reactor tenga una futura construcción para la elaboración de papel y también otros procesos con reactivos, se tiene en cuenta que para equipos de laboratorio a mediana escala se usan volúmenes de 0.25 a 5 litros y la velocidad puede ir de 0 a 2000 rpm [78]. Por lo tanto, se diseñó un reactor de 5 litros ya que los procesos descritos en este documento son de volúmenes de baja cantidad, además los materiales de construcción de los reactores a pequeña y mediana escala, pueden ser de vidrio o metal; mientras que para mayores volúmenes se usa solamente recipientes de metal.[78]

3.2.2.1.2. Cálculo del volumen del cilindro del reactor

Se realizó el cálculo para la dimensión del cilindro del reactor tomando un volumen para el mismo de 5 litros.

$$V = \pi * r^2 * h \quad \text{Ecuación 3.}$$

teniendo en cuenta la figura 61, se obtienen las dimensiones del cilindro

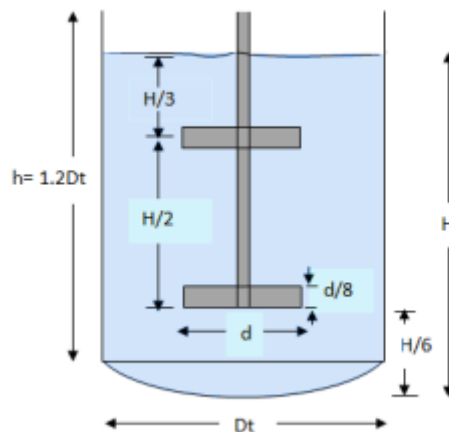


Figura 61. Dimensión de cilindro. [73]

$$V = \frac{\pi * Dt^2 * 1.2Dt}{4}$$

$$Dt = 0.1745m \approx 17.5 \text{ cm}$$

$$h = 1.2Dt$$

$$h = 1.2 * 17.5 = 21 \text{ cm}$$

Reemplazando los valores en V

$$V = \frac{\pi * Dt^2 * h}{4}$$

$$V = \frac{\pi * 17.5^2 * 21}{4}$$

$$V = 5051.09 \text{ cc}$$

$$V_1 = 5.05 \text{ L}$$

En este caso, con base en [73], se dejarán 5 cm de altura adicionales como factor de seguridad del 1.25, para evitar que los cambios del material dentro del reactor durante su funcionamiento causen algún tipo de problema, de esta manera se mejora la eficiencia del proceso. Por esta razón la altura final del tanque es de 26 cm. La figura 62, muestra las dimensiones del biorreactor en software CAD.

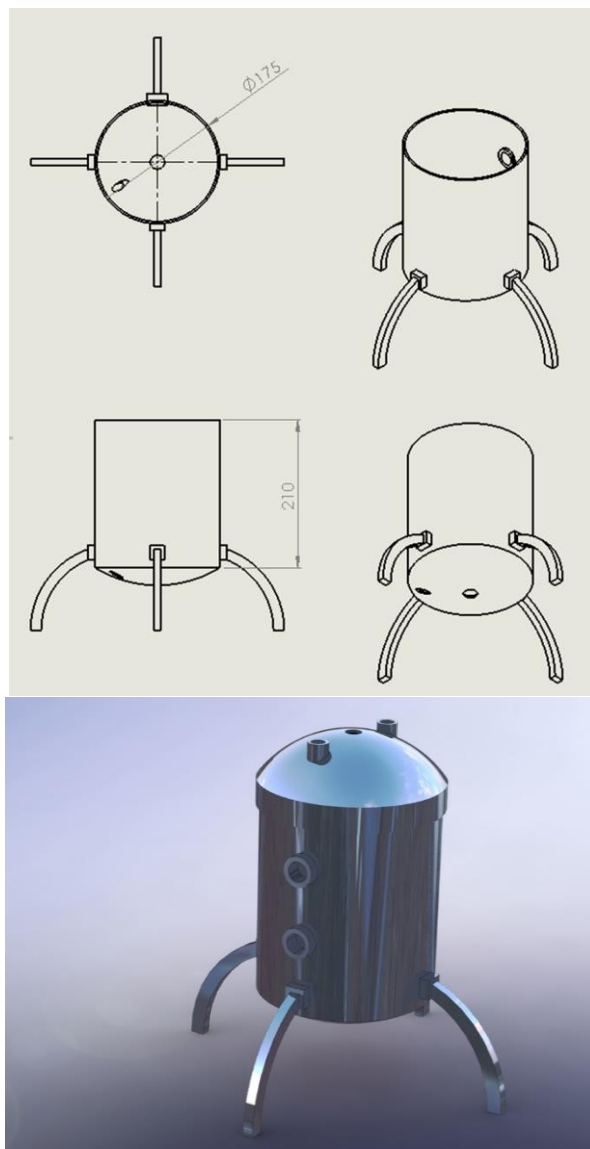


Figura 62. Dimensiones del biorreactor y vista renderizada en software CAD.

Así, se toma v_1 más el volumen del asiento redondeado (v_2), el cual se calculó con el volumen de un casquete esférico [81].

$$Vr = v1 + v2$$

$$V_2 = \frac{1}{3} * \pi * hc^2 * (3 * r - hc)$$

$$V_2 = 556 \text{ cc} \approx 0.5 \text{ L}$$

$$V_r = 5.05 + 0.5 = 5.55 \text{ L}$$

3.2.2.1.3. Cálculos para el sistema de agitación

El diseño del sistema de agitación se desarrolla en base a un agitador de turbina.[82] como se muestra en la figura 63, ya que este tipo de impulsor trabaja principalmente para fluidos de baja viscosidad y para velocidades que pueden ser medias o altas [70].

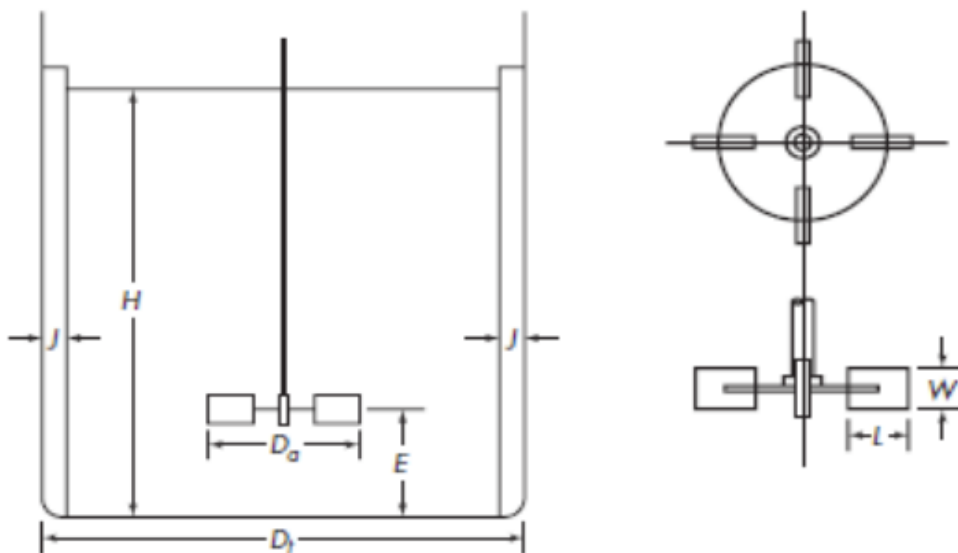


Figura 63. Medidas de un agitador tipo turbina. [83]

En donde:

Da= Diámetro del impulsor

Dt= Diámetro del tanque

H= Altura óptima del líquido

J= Ancho de los deflectores (de ser necesarios)

W= ancho de las paletas impulsoras

L= Longitud de las paletas impulsoras

Para el diseño del agitador se decidió usar una turbina con seis aspas montadas sobre un disco o también conocido como turbina rushton, Figura 64, ya que estas son muy recomendables para líquidos de baja a media viscosidad. [77]

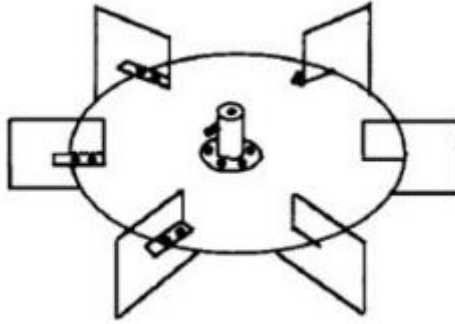


Figura 64. Turbina tipo Rushton con seis palas montadas sobre un disco. [77]

Para el diseño de un agitador de turbina tipo Rushton como se observa en la figura 63. sus proporciones típicas son:

$$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{E}{Dt} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{W}{Da} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{L}{Da} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{H}{Dt} = 1$$

$$\frac{J}{Dt} = \frac{1}{12}$$

De esta forma se puede obtener:

- **Diámetro del impulsor**

$$Da = \frac{Dt}{3}$$

$$Da = \frac{17.5}{3}$$

$$Da = 5.83 \text{ cm}$$

- **Altura del impulsor**

$$E = \frac{Dt}{3}$$

$$E = \frac{17.5}{3}$$

$$E = 5.83 \text{ cm}$$

- **Ancho de las paletas impulsoras**

$$W = \frac{Da}{5}$$

$$W = \frac{5.83}{5}$$

$$W = 1.17 \text{ cm}$$

- **Longitud de las paletas impulsoras**

$$L = \frac{Da}{4}$$

$$L = \frac{5.83}{4}$$

$$L = 1.46 \text{ cm}$$

- **Altura óptima del líquido**

$$H = Dt * 1$$

$$H = 17.5 \text{ cm}$$

- **Ancho del deflector**

$$J = \frac{Dt}{12}$$

$$J = \frac{17.5}{12}$$

$$J = 1.46 \text{ cm}$$

- **Placa circular o disco**

$$D_{pl} = Da - L$$

$$D_{pl} = 5.83 - 1.46$$

$$D_{pl} = 4.37 \text{ cm}$$

- **Espesor de la placa circular**

$$x = 0.035 * Da$$

$x = 0.2 \text{ cm}$



Tabla X. Parámetros geométricos del agitador de turbina tipo Batch.

3.2.2.1.4. Cálculo de la potencia en el agitador

54

Para determinar la potencia requerida del motor para el agitador se deben conocer las características de fluido a ser mezclado, como son principalmente la densidad y la viscosidad. [78].

Cálculo del número de Reynolds

$$N_{Re} = \frac{Da^2 * N * \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

N_{Re} : Numero de Reynolds (adimensional).

Da^2 : Diámetro del impulsor (m^2)

N : Velocidad de rotación (rps)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3)

μ : Viscosidad del fluido ($Kg/m * s$)

Para el cálculo del número de Reynolds se tomó una velocidad de (400 RPM), debido a que esta fue un punto de partida para las mezclas de los reactivos, por otra parte se hizo una tabla con la densidad de los reactivos utilizados en las rutas alcalinas y ácidas.

Tabla XI. Densidad de los reactivos (NaOH-H2O2-HCL-NHO3-H2SO4).

Nombre del reactivo	Fórmula química	Densidad(ρ)
Hidróxido de sodio	$NaOH$	2.13 g/cm^3
Peroxido de hidrogeno	H_2O_2	1.45 g/cm^3
Ácido clorhídrico	HCL	1.836 g/cm^3
Ácido nítrico	HNO_3	1.51 g/cm^3
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	1.83 g/cm^3

Como se aprecia en la tabla XI. El reactivo hidróxido de sodio es más denso, por lo tanto se va tomar como referencia para el cálculo del número de Reynolds. Este tiene como características, una densidad de 1520 kg/m^3 , a $20^\circ C$ y una viscosidad dinámica de $78 \text{ mPa} * s$, a $20^\circ C$ [128].

De esta manera tenemos los siguientes datos de entrada:

Da^2 : Diámetro del impulsor (m)² = $(0.0583m)^2$

N : Velocidad de rotación (rps) = 6.67 rps

ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3) = 1520 Kg/m^3

μ : Viscosidad del fluido ($Kg/m * s$) = $0.078 \text{ kg/m} * s$

Reemplazando en la ecuación 4.

$$N_{Re} = \frac{(0.0583)^2 * 6.67 * 1520}{0.078}$$

$$N_{Re} = 441.79$$

El valor de número de Reynolds define si el fluido es turbulento o laminar, de la siguiente manera:

- Si el $N_{Re} < 10$ corresponde a un flujo de régimen laminar.
- Si el $10 < N_{Re} < 10000$ corresponde a un flujo de régimen transitorio, esto quiere decir que es turbulento en el centro y laminar en las partes más lejanas.
- Si el $N_{Re} > 10000$ corresponde a flujo de régimen turbulento.

En conclusión el fluido del reactor batch será de tipo transitorio.

Número de potencia (Np)

Su ecuación es:

$$Np = \frac{P}{N^3 * Da^5 * \rho} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

P : Potencia de agitación (watts)

Da^5 : Diámetro del impulsor (m)⁵

N : Velocidad de rotación (rps)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3)

El número de potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de arrastre que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza inercial. La fuerza inercial a su vez, está asociada con el flujo de cantidad de movimiento correspondiente al movimiento global del fluido. Cuando los agitadores usan deflectores no es importante esta relación, por lo cual no se incluye en el número de Froude que es utilizado para medir dicha relación.[83]

Luego de obtener el número de Reynolds, es posible determinar el número de potencia Np mediante la figura 66, donde se muestran las gráficas del Np en función del Re.

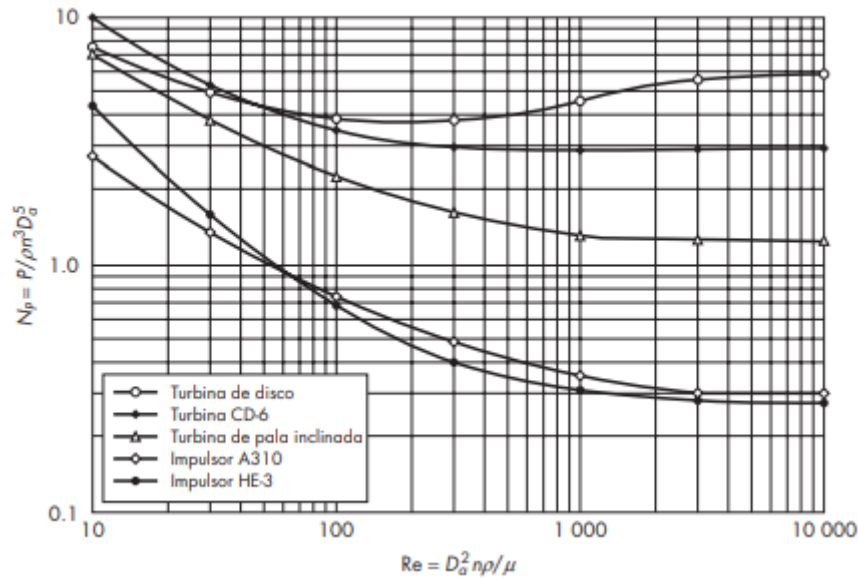


Figura 66. Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia.[83]

Como se puede observar en la Figura 66, la curva de turbina de disco que corresponde a la escogida para el diseño del reactor, con el número de Reynolds 500 aproximadamente, se obtiene un número de potencia de 4.

Despejando la potencia de agitación (P), se tiene:

$$P = N_p * N^3 * D_a^5 * \rho$$

$$P = 4 * (6.67)^3 * 0.0583^5 * 1520$$

$$P = 1.215 \text{ W}$$

3.2.2.1.5. Material del reactor

El tipo de material seleccionado para un reactor en los procesos de la ruta alcalina son los aceros 300 por sus características de preservar la calidad de los alimentos y propiedades de alta resistencia a la corrosión. además de su aplicación en industrias farmacéuticas y alimenticias para la prevención de contaminantes.

De esta manera para el diseño del reactor discontinuo ideal tipo batch, se escogió el acero AISI 304, teniendo en cuenta sus siguientes características:

- Muy resistente a la corrosión y la oxidación
- Facilidad para soldar o embutición
- Costo económico y fácil de limpiar
- Resistente al calor a bajas temperaturas. [78]

Por otra parte, el tipo de material para un reactor en los procesos de la ruta ácida es el vidrio borosilicato, ya que posee propiedades de resistencia química, una dilatación térmica mínima y una elevada resistencia al choque térmico. esto hace que el material sea ideal para el uso en reactores de laboratorio, así como en grandes plantas industriales.

3.2.2.2. Compactador Neumático

Bases tipo tamiz

Para la conformación de papel es necesario filtrar la humedad del material, de igual manera es necesario una base donde se deposite la materia prima. Debido a ello se requiere una base donde se sujeta una malla tipo filtro como se muestra en la figura 67, donde se tiene en cuenta la medida de una hoja de papel tipo carta, el material para realizar el molde es una placa de acero inoxidable de 2 mm, AISI 201.

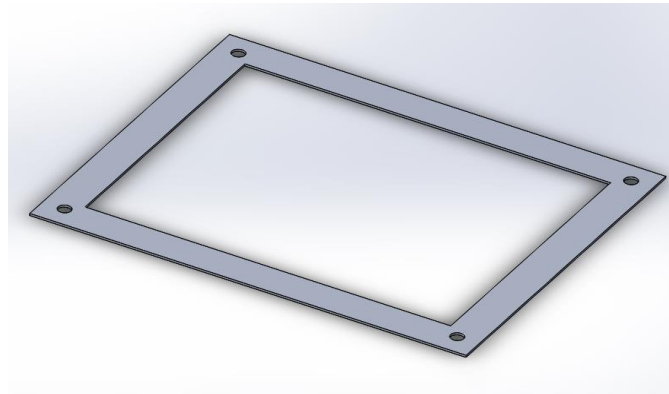


Figura 67. Base para tamiz.

Pistones neumáticos

A seguir, para el sistema de compactación, pensado en el prensado de materiales se opta por cilindros neumáticos, cuyas características están predefinidas por el fabricante. En este sentido, se destaca un cilindro de dos estados para regular la presión de forma adecuada durante la conformación (ver figura 68). Como observado en el diseño a mano alzada serían necesarios 4 de estos, ubicados en los extremos del compactador para un mejor control de presión y posición.

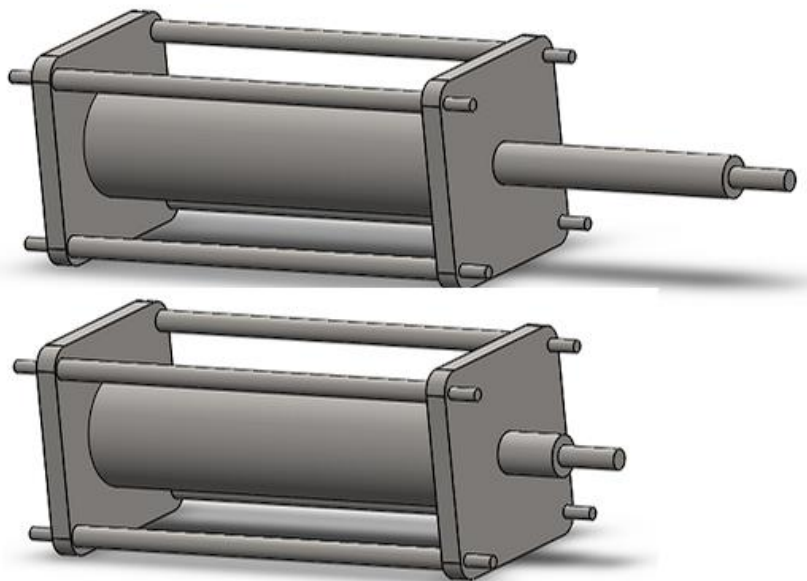


Figura 68. Cilindro neumático doble efecto.

Estructura del prototipo

Teniendo en cuenta las características y medidas del pistón neumático, la base del prototipo se diseña en forma cuadrada, tal que se puedan ubicar todos los elementos que requiere el sistema. Primero se parte por una base en la cual se pueda ubicar una resistencia de calor, para el secado durante la conformación (ver figura 69, A), además una tapa superior la cual se encarga de ejecutar la presión que ejercen los pistones sobre el material a compactar (ver figura 69, B). Para estas tapas se usa una lámina de mayor espesor, dado que para realizar la compactación se necesita un molde rígido. Para ello se usa una placa de acero al carbono Q195, ASTM de 10 mm y 5 mm, para la tapa inferior y superior, respectivamente.

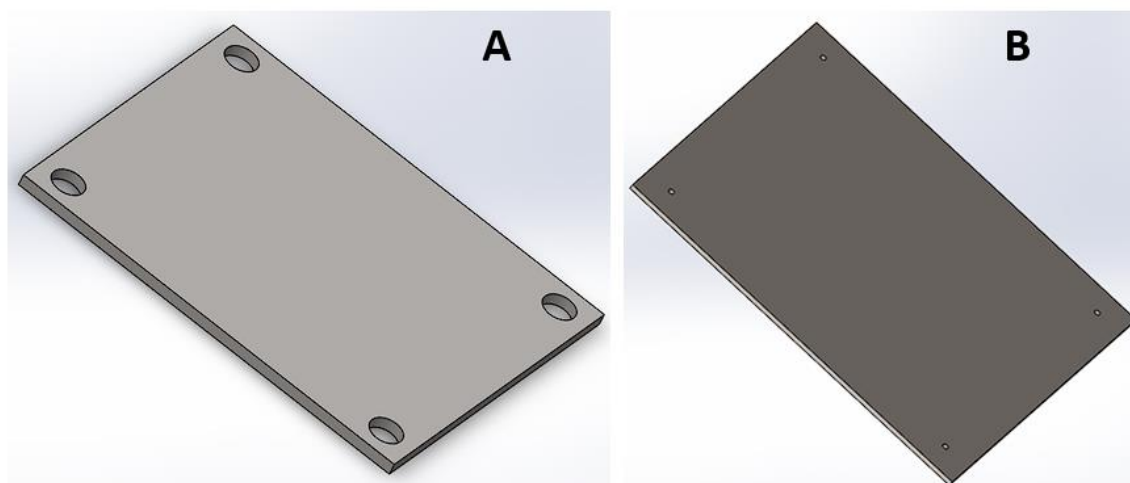


Figura 69. Base inferior y superior del prototipo.

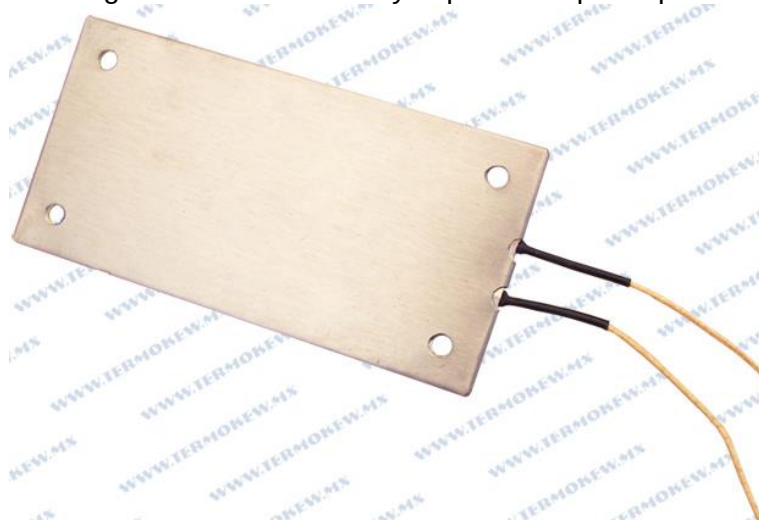


Figura 70. Resistencia de calor tipo tira mica.

Para el calentamiento del sistema se hace necesario una resistencia tipo tira mica. Esta resistencia se ubica en la base que soportan los cilindros, así, al momento de la compactación se presenta una transferencia de calor de manera superficial que permitirá una forma más eficaz de cumplir con el objetivo de una prensa de calor, el cual es secar y moldear además de compactar el papel.

Distribución de calor en la placa A.

Teniendo en cuenta el material y el tipo de resistencia a usar se hace un análisis de la distribución de calor a partir de una lámina de tira-mica, en contacto con la placa A (inferior), del prototipo, la cual tiene como objetivo soportar el calor y la humedad del material a compactar. Se puede notar que una sola resistencia no es suficiente para la distribución de

calor en todo el material (Figura 71). Así se hace el mismo análisis con dos resistencias tipo tira mica (Figura 72), donde se observa una mejor distribución del calor para el proceso de compactado.

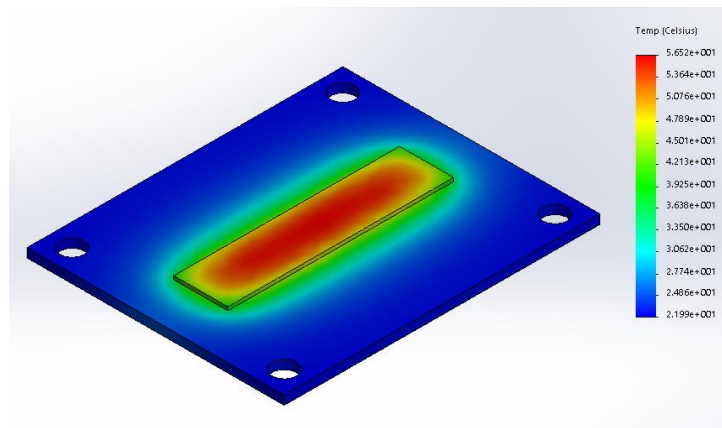


Figura 71. Estudio de distribución de calor placa A.

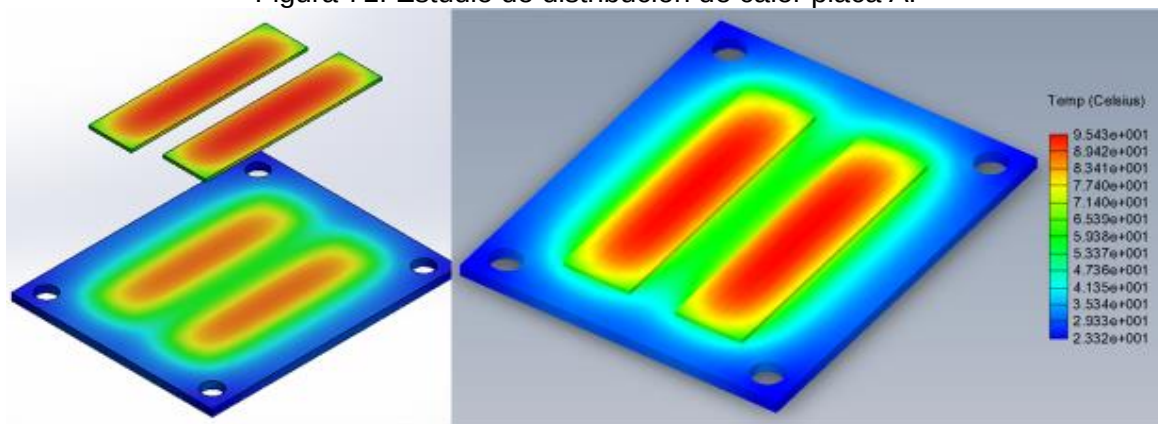


Figura 72. Estudio de distribución de calor placa A con dos resistencias de calor.

Para el recubrimiento del prototipo se diseña una caja en lámina de acero inoxidable de 3 mm, AISI 201 y tubo cuadrado de acero inoxidable de 8mm de 10*10 mm (ISO9001), donde además de incluir los elementos del prototipo se ubicará el sistema de control y las entradas de aire para el sistema neumático (figura 73).

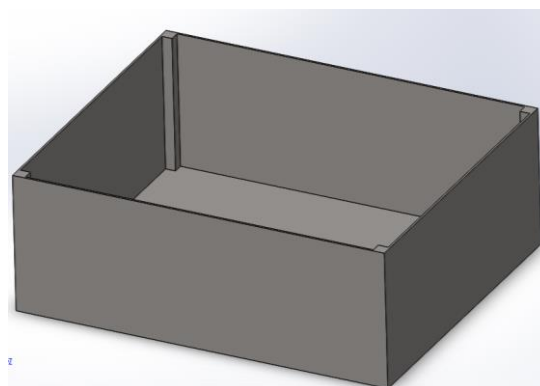


Figura 73. Base de compactador neumático.

Ensamble de las partes

Así, se procede a ensamblar las partes para el prototipo del compactador neumático como se muestra en las figuras 74 y 75.

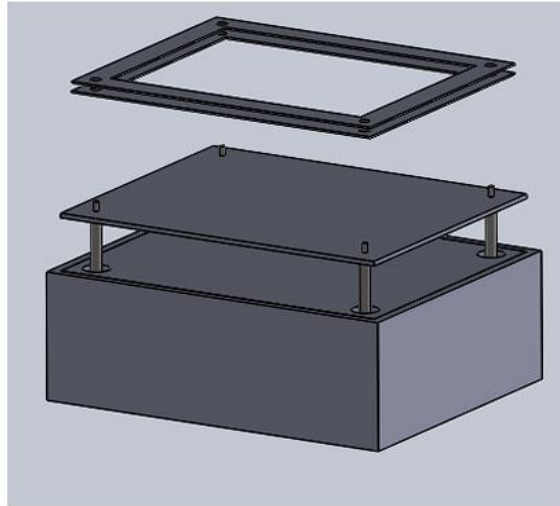


Figura 74. Ensamble del sistema compactador neumático.

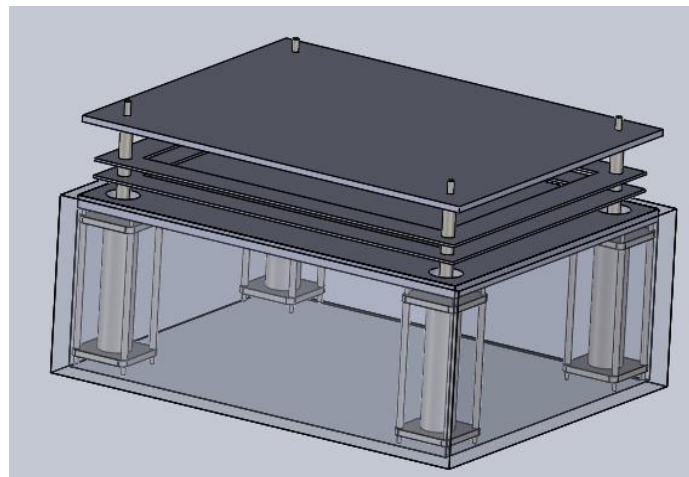


Figura 75. Compactador neumático.

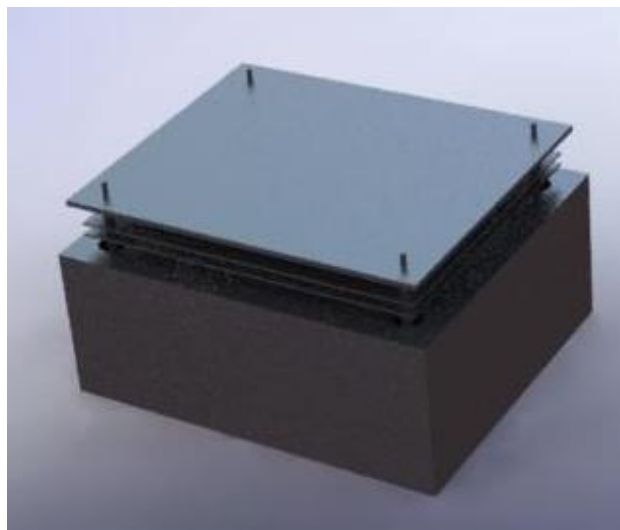


Figura 76. Renderización de compactador.

Este sistema está diseñado en material tipo acero inoxidable, AISI 201 y Q195, debido a que la mayoría de partes estarán en contacto con humedad y calor.

3.2.2.2.1. Control neumático del prototipo

Para diseñar y simular el circuito y funcionamiento del sistema de compactación se usa el software FluidSIM de la compañía FESTO.

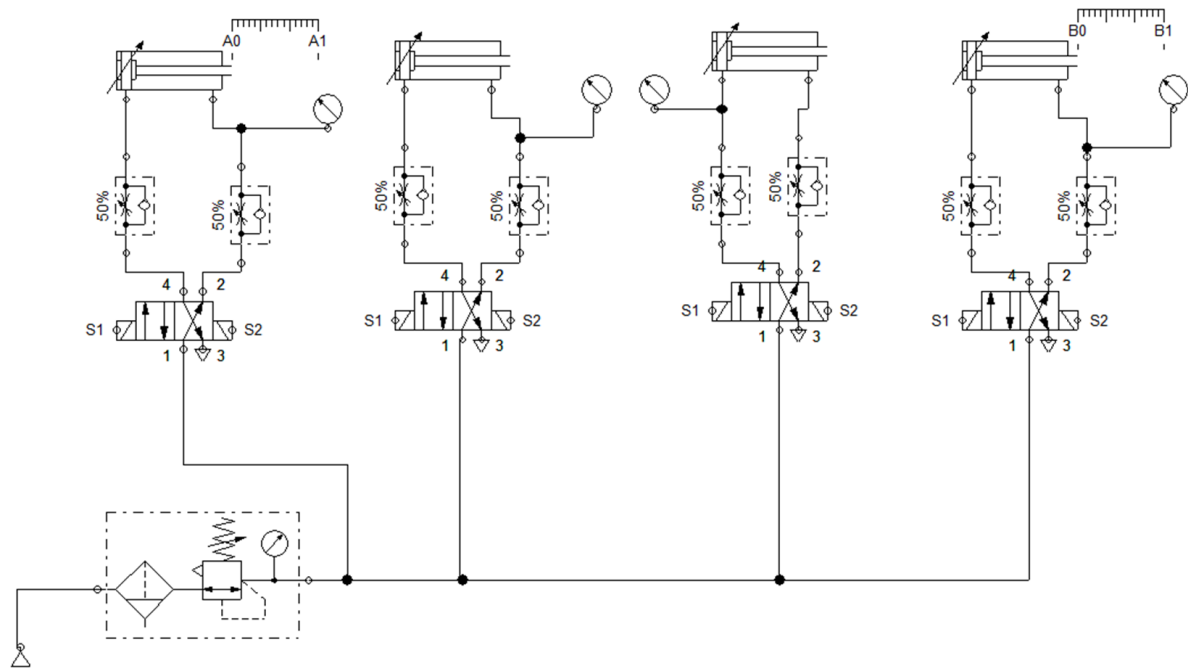


Figura 77. Circuito de control neumático.

A continuación, se describen los componentes que se muestran en la figura 77. Para el correcto funcionamiento del prototipo, primordialmente se necesita una fuente neumática la cual se conecta al sistema de mantenimiento neumático, el cual se compone por un filtro de aire y un regulador de presión (Generalmente 6 bar). Como mencionado previamente, se utilizan cilindros doble efecto para mantener la presión al momento de compactar papel, para ello se usan válvulas reguladoras, cuya función es limitar el paso de aire, controlando así la entrada y la salida de este. Todo este sistema es accionado por válvulas 4/2 (4 vías y 2 estados), accionadas a ambos lados por solenoides y con un seguimiento de finales de carrera para el recorrido.

3.2.2.2.2. Control eléctrico y electrónico de control

Para diseñar y simular el circuito y funcionamiento del sistema de control se usa el software FluidSIM (FESTO) además de Proteus de la compañía Labcenter Electronics. Así, para el control neumático se usa un circuito de 24 voltios en FluidSIM y simultáneamente el control para la temperatura e interfaz de usuario se realizan en Proteus.



3.2.2.2.3.Programación

63

```

#include <16f877a.h>
#define ADC=10
#define Hs
#define delay(clock=1000Hz)
#include<lcd.c>

long p;
long t;

void main()
{
    lcd_init();
    setup_ADC(adc_clock_div_8);
    setup_adc_ports(AN0);

    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc "Bienvenido a ");

    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc "compactar papel ");
    delay_ms(3000);

    while(TRUE)
    {
        set_adc_channel(0);
        p=read_adc();

        t=(p/2)-1;
        lcd_gotoxy(1,1);
        printf(lcd_putc "temperatura=%li ",t);

```

A

B

```

if(t<=30)
{
    output_low(pin_b1);
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc "Calor:Aumentando ");
}

if(t>30 && t<45)
{
    output_low(pin_b1);
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc "Calor: Listo ");
}

if(t>=45)
{
    output_low(pin_b1);
    output_high(pin_b1);
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc "Calor: Muy alto ");
}
}

```

Figura 80. Algoritmo en C ++ para compactador.

3.2.2.2.4. Simulación

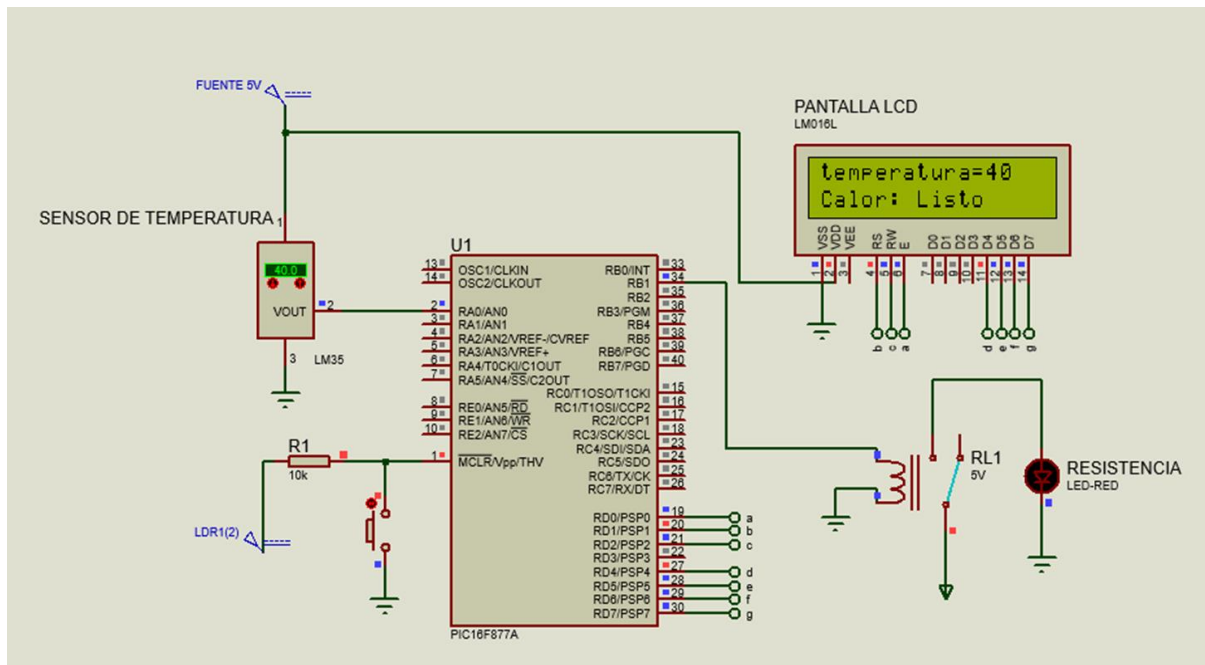


Figura 81. Simulación de circuito

En la simulación en Proteus se puede ver la lectura de temperatura y el aviso que el sistema está acondicionado para compactar. Los avisos que también se pueden dar son el de **calor: aumentando** y **calor: muy alto**, los cuales aparecen cuando la temperatura está muy baja o en exceso, respectivamente.

3.2.3. Descripción del proceso y uso del compactador neumático.

Para hacer uso del compactador el material debe tener las características propuestas en la obtención de fibra celulosa, para ello se sigue la ruta que se muestra en la figura 82.

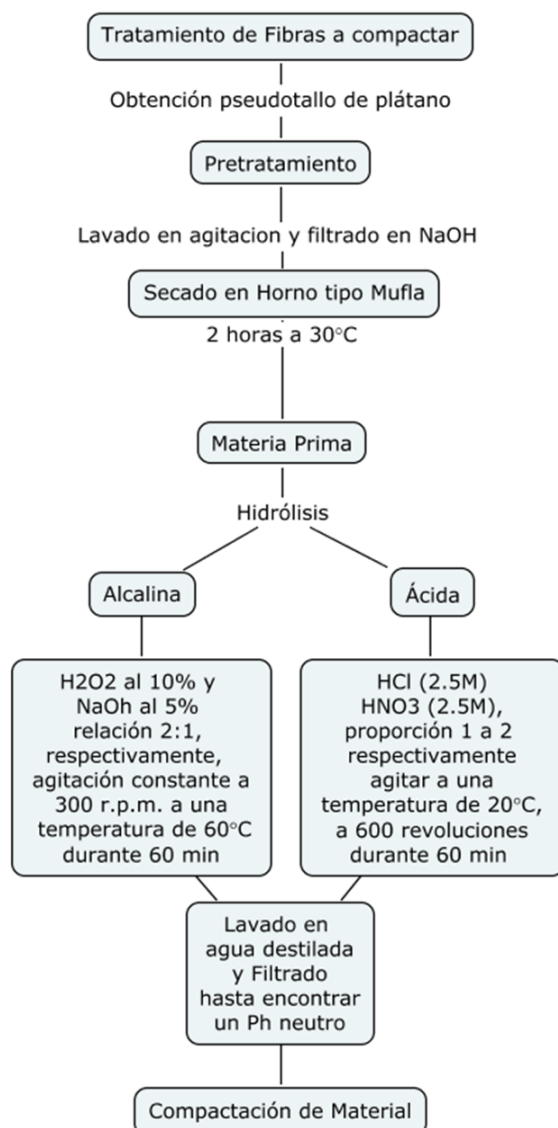


Figura 82. Procesamiento de fibras de pseudotallo para compactación de papel orgánico.

Así entonces con el material listo para compactar se inicia el proceso que se describe a continuación: Como primer paso está la extracción de la tapa superior del compactador y la extracción del tamiz base, esto para disponer el material en el tamiz. Agregar la materia prima distribuida en todo el tamiz sin excesos. El segundo paso es asegurar el tamiz y la tapa superior del prototipo. Una vez se ubica el tamiz y la tapa se pasa a iniciar la compactación. Este proceso requiere que se accione el pulsador Start, el cual inicia el proceso, empieza la resistencia de calor tipo tira mica a calentar la superficie de la placa inferior, hasta una temperatura máxima de 45°C, llegada esta temperatura el compactador mostrará en la pantalla LCD es mensaje Listo, para el primer proceso se debe esperar este tiempo de calentamiento, de lo contrario la resistencia siempre estará lista, los cilindros neumáticos se activan a través de un solenoide lo cual comprime la tapa superior hacia la inferior, entrando en contacto el tamiz con la placa inferior, en esta etapa espera un tiempo de 5 minutos, donde se hace la compactación del material además de reducir humedad del mismo. Una vez

concluye este tiempo el compactador se abre nuevamente para empezar otro proceso. empezando por la extracción del proceso anterior. El prototipo cuenta con un paro de emergencia en caso de mal proceso y/o mal manejo. Se recomienda el uso de guantes de calor para la extracción del papel resultante.

3.2.4. Presupuesto

A seguir se presenta el presupuesto de los materiales para la implementación del biorreactor y el sistema de compactación

Tabla XII. Presupuesto de materiales para construcción del biorreactor y el sistema de compactación.

Rubros	Justificación	Unidad	Cantidad	Fuentes (en pesos colombianos)		
				Recursos propios	Convocatoria externa	Total
Reactor o bioreactor	Acero inoxidable 304	unidad	1	1.250.000,00		\$1.250.000,00
	Acero inoxidable 304 tapa	unidad	1	72.000,00		\$72.000,00
	Camisa de calefacción a. inoxidable 304	unidad	1	400.000,00		\$400.000,00
	Control de temperatura	unidad	1	396.500,00		\$396.500,00
	Control o reductor de velocidad	unidad	1	200.000,00		\$200.000,00
	Empaques	unidad	1	100.000,00		\$100.000,00
	Mano de obra (aproximado)	horas	480	4.800,00		\$2.304.000,00
	Motor electrico 25w	unidad	1	166.000,00		\$166.000,00
	Otros (tornillos, empaques, tapas, etc)	unidad	1	100.000,00		\$100.000,00
	Elementos Panel de control	unidad	1	200.000,00		\$200.000,00
	Sensor de ph	unidad	1	190.000,00		\$190.000,00
	Sistema de calefacción	unidad	1	169.000,00		\$169.000,00
	Suelda en acero convencional	unidad	1	250.000,00		\$250.000,00
	Suelda en acero inoxidable TIG	unidad	1	195.000,00		\$195.000,00
	Termocupla	unidad	1	49.000,00		\$49.000,00
	Turbina, Helice o agitador	unidad	1	450.000,00		\$450.000,00
	Valvulas	unidad	4	132.000,00		\$528.000,00
	Sensor de nivel	unidad	2	35.000,00		\$70.000,00
Compactador de papel	Cilindros neumaticos	unidad	4	212.000,00		\$848.000,00
	Valvulas Solenoides 5/2 - doble bobina	unidad	4	118.000,00		\$472.000,00
	Unidad de mantenimiento neumatico	unidad	1	230.000,00		\$230.000,00
	Manómetro	unidad	4	25.000,00		\$100.000,00
	Válvula estranguladora	unidad	8	44.000,00		\$352.000,00
	Extras mangueras, tornillos y tuercas					\$50.000,00
	Lamina acero inoxidable 2mm	unidad	1	100.000,00		\$100.000,00
	Lamina acero inoxidable 3mm	unidad	1	130.000,00		\$130.000,00
	Lamina acero inoxidable 5mm	unidad	1	180.000,00		\$180.000,00
	Lamina acero inoxidable 10mm	unidad	1	250.000,00		\$250.000,00
	Tubo cuadrado 10x10mm	unidad	1	110.000,00		\$110.000,00
	Compresor	unidad	1	480.000,00		\$480.000,00
	Resistencia tipo Tira Mica	unidad	2	90.000,00		\$180.000,00
	Fresado de lamina	unidad	1	80.000,00		\$80.000,00
	Malla Tamiz 25 µm	unidad	1	234.000,00		\$234.000,00
	LCD	unidad	1	15.000,00		\$15.000,00
	Sensor de temperatura	unidad	2	113.000,00		\$226.000,00
	PIC 16f877a	unidad	1	42.000,00		\$42.000,00
	Extras cable, Reles, Pulsadores					\$50.000,00
	Manofactura	horas	320	4.800,00		\$1.536.000,00
Total						\$12.754.500,00

3.2.5. Validación del papel sintetizado como filtro de agua

Adicionalmente se realizó un proceso de validación, para usar este tipo de papel como filtro. Así entonces, usando para ello diversas membranas de papel orgánico sintetizadas, de los materiales de experimentación, se colocaron sobre la porta filtro diseñado (Ver Figura 83). De esta forma se deja pasar sobre estos una cantidad de agua turbia, con el fin de observar el proceso de filtración de agua, esperando obtener un agua libre de turbidez del otro lado del filtro a base de las membranas de celulosa.



Figura 83. Diseño de la porta filtro.

Para este proceso, en una bureta de 25 ml se agregó el agua turbia (Figura 84, A), que se preparó con arcilla, la cual previamente fue mezclada con agitación magnética a temperatura ambiente. La figura 84a, muestra el agua turbia preparada. A continuación, se dejó caer gotas de la mezcla preparada sobre el filtro a una tasa de 45 gotas por minuto, hasta que los 25 ml fueran filtrados como se muestra en la figura 84, C.

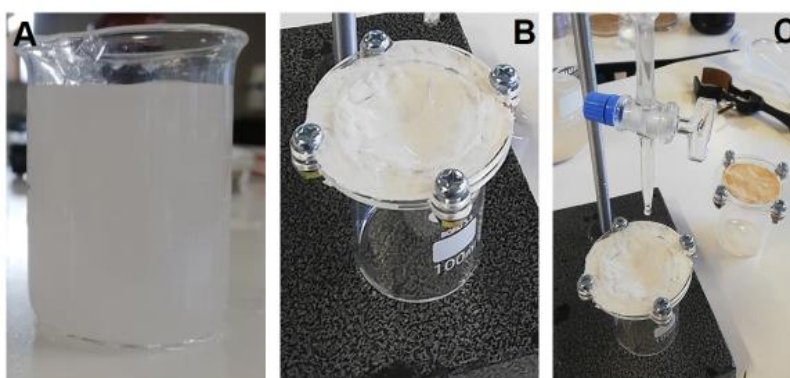


Figura 84. Proceso de filtración para validación del papel sintetizado.

En la figura 85, se puede notar la reducción de arcilla al paso por el filtro, dada la coloración del agua. Así mismo las pruebas que se hicieron están relacionadas con la densidad del filtro. Para ello, se tomaron muestras de filtro de dimensiones de 1 x 1 cm y se midió su espesor para calcular el volumen del filtro. Esta muestra se pesó y de esta manera se calculó la densidad del filtro la cual fue de $0,0304 \text{ Kg/cm}^3$



Figura 85. resultados de filtración.

Se emplearon dos tipos de filtros, el primero con ácido clorhídrico y ácido nítrico, el segundo con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico y como resultado se observó que hubo diferencia de color de las aguas filtradas (Ver figura 85), frente a el agua turbia. A partir de esta prueba se tomaron muestras del filtro después de haber sido usado para retener partículas de arcilla y

se contrastó con el filtro sin usar. Las muestras fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido como se muestra a continuación.

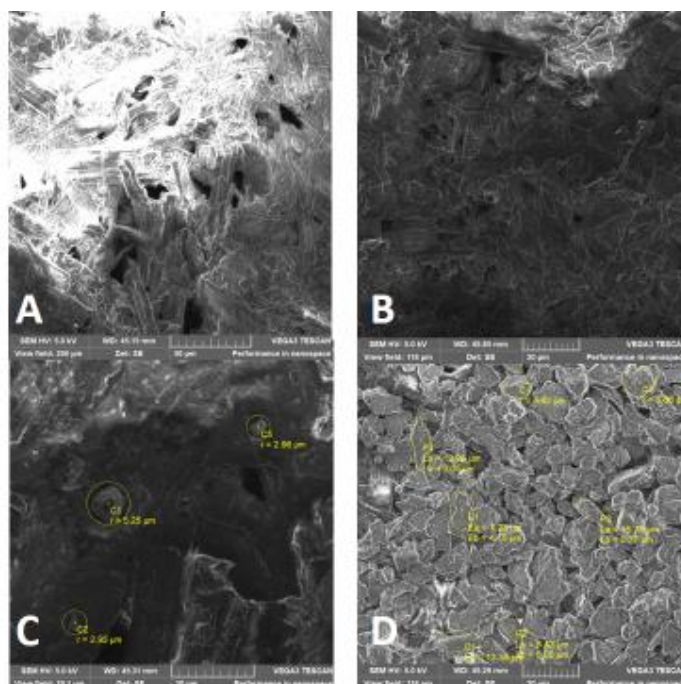


Figura 86. Retención de partículas de arcilla; (A) Filtro sin usar del tratamiento ácido HCl y H₂SO₄, (B) Filtro sin usar del tratamiento ácido con HCl y HNO₃s, (C) y (D) Medición de partículas retenidas en cada material.

Una vez realizado el proceso de filtración, se hizo una medición de ppm y conductividad eléctrica de los líquidos filtrados, con el fin de determinar la capacidad de disminuir partículas contaminantes del filtro de microcelulosa. Con base en las mediciones realizadas, se obtuvieron los siguientes datos promedio de las variables químicas (Ver Tabla XIII).

Se puede concluir que los materiales usados para filtrar poseen capacidades de ionización, las cuales pueden aplicarse en el tratamiento de elementos contaminantes y metales, resaltando la capacidad del ácido nítrico de retener mayor cantidad de partículas y su conductividad para aplicaciones de electrónica, bioingeniería y nanotecnología.

Tabla XIII. Variables medidas en la filtración.

<i>Muestra</i>	<i>Tensión eléctrica (mV)</i>	<i>ppm</i>	<i>Conductividad eléctrica (μs)</i>
<i>Muestra sin filtrar</i>	201	27.8	56
<i>Muestra 1</i>	189.5	44.7	89.2
<i>Muestra 2</i>	195.2	34.3	68.35
<i>Agua</i>	175	33.8	69.6

Se determinan aspectos importantes como la definición de la metodología para obtener un filtro a partir de residuos de plátano. En ese sentido se estableció la metodología donde el factor más importante es la inclusión de Ácido clorhídrico y ácido nítrico, con el fin de disminuir tamaño de fibras y de esta forma obtener tamaños de poro no mayores a 10 micrómetros.

Las pruebas estructurales del filtro permitieron observar tamaño de poros y densidad de los mismos, y se observaron las diferencias entre una fibra natural y la modificada mediante los procesos químicos. Así mismo, se observó mediante microscopía electrónica de barrido, la capacidad del filtro para retener elementos contaminantes, en este caso, se logró demostrar que el filtro puede retener partículas de arcilla con diámetros de 4 micrómetros.

CAPÍTULO IV – Conclusiones

El desarrollo de este proyecto de investigación logra identificar características y especificaciones, que se deben tener en cuenta para el proceso de obtención de celulosa, que sirven de base para el desarrollo de los prototipos propuestos. Así, es posible concluir lo siguiente:

Después de la adecuación de la materia prima, el proceso químico de ruta alcalina, usado para el blanqueamiento y eliminación lignina y hemicelulosa, que mostró mejores resultados fue el basado en hidróxido de sodio (NaOH) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), a una relación 1:2 con lavado previo en NaOH. La agitación se da a una temperatura de 60°C, por un periodo de 1 hora, a 300 r.p.m. Filtrado y lavado del material, por lo menos 5 lavados, hasta obtener un pH neutro. Esta será una ruta amigable y sostenible para el medio ambiente. La ruta ácida requiere el pretratamiento, y un lavado en NaOH para evitar la pigmentación del material al aplicar una reacción más agresiva como lo es el tratamiento ácido. Se escoge la solución de HCl (2.5M) y HNO_3 (2.5M), con proporción 1 a 2 respectivamente con agitación magnética a 600 r.p.m, por un periodo de una hora, ajustando la temperatura a 20°C.

El diseño se desarrolla logrando controlar las variables establecidas para el agitador y para la máquina compactadora tales como temperatura, velocidad, presión y características estándar del material que se requiere crear. Las propiedades del material conformado, se pueden adecuar según la aplicación y la cantidad del material, así, se considera que para ello se debe crear un tamiz con la preforma requerida para compactar el material.

De esta forma se implementó un sistema electromecánico, usando cilindros neumáticos caracterizados por ser doble efecto, con un sistema de accionamiento eléctrico para activar solenoides, la estructura planteada para el prototipo de sistema semiautomatizado presentado soporta adecuadamente las reacciones químicas que se dan en el agitador, y la máquina compactadora resiste las temperaturas que actúan sobre ella, dando garantía al factor de seguridad de la estructura. Para el diseño estructural, los principales materiales usados para la implementación de un prototipo son: el acero inoxidable AISI 201, Q195, ASTM (316L, diferente espesor) resistentes a la corrosión y al calor.

Este sistema incluye el uso de manómetros para verificar la presión que se ejerce en el compactador, finales de carrera que tienen la funcionalidad de indicar la posición de los cilindros neumáticos para así controlar el tiempo de conformado del material. Con base en esto, para la elaboración de la máquina compactadora se estima un presupuesto aproximado de 20 millones de pesos para materiales e insumos.

En el momento de desarrollar el código de programación para la ejecución de los procesos se implementó el método de máquinas, utilizando un control PI (ON/OFF) el cual presentó la mejor respuesta para el sistema. Puesto que no se necesita un control riguroso, sino un tiempo de espera debido a que la principal función es agitar y compactar por medio de un motor y resistencias de calor junto a cilindros neumáticos, respectivamente.

En general, se puede decir que para el residuo de Musa × paradisiaca (Platanera) fue diseñada una ruta de procesamiento, como una alternativa para reducir el consumo de papel, la reducción de tala de árboles, la innovación en procesos de producción y el fortalecimiento en la zona sur del Cauca, donde se da la plantación de este fruto. Vale tener en cuenta que, la caracterización morfológica de los compuestos puede diferir por variables externas como el suelo, fertilizantes, control químico de plagas, enfermedades, entre otras.

CAPITULO V – Recomendaciones y Trabajos Futuros

Teniendo en cuenta los resultados se procede a realizar las siguientes recomendaciones:

Los tratamientos experimentales se realizaron a pequeña escala, para tratamientos industriales se debe proporcionar los reactivos con respecto a la masa de muestra, aunque se afirma que el tiempo y la cantidad de material no son determinantes en el resultado del material a obtener [103], excepto en el porcentaje de celulosa que se desea obtener.

Para el agitador se recomienda usar vidrio (Borosilicato), debido a que soporta todo tipo de reacción dentro del cilindro del biorreactor. Para el uso del compactador se recomienda el uso de protección personal, guantes resistentes térmicos, para evitar quemaduras al estar en contacto con el sistema, también el uso de gafas, tapabocas y bata de laboratorio para la agitación en proceso ácido para evitar contacto con la piel y entrada de gases en ojos, boca y nariz. Una mejora en el compactador es la adición de un sistema de extracción de residuos, los cuales quedan en el sistema en cada compactación.

Para las fibras y celulosa se tienen diversas aplicaciones, entre ellas la extracción de aceites y alcoholes derivados de las reacciones en el material. En la industria petroquímica es de gran importancia el aceite para las diferentes aplicaciones en la vida diaria, como lo es aceites naturales y aceites combustibles [124]. También las membranas de celulosa tienen un uso en los intercambios iónicos, el acetato de celulosa es usado para la retención de iones o cationes, según la aplicación lo requiera, debido a sus enlaces, actuando como filtro para la desalinización, desendurecimiento, desinfección y clarificación[125]. En ese sentido, es claro que la síntesis de compuestos o nanocompuestos a base de celulosa es de gran atracción para desarrollos tecnológicos.

El material que se obtuvo en esta investigación se puede aplicar en cualquier área, como un bio-compuesto, biopolímero y usos propios de la utilización de fibras. Para una aplicación enfocada en nanocompuestos este material debe someterse a más procesos de reducción, las películas del material son biodegradables debido a sus componentes, donde sus propiedades mecánicas pueden cambiar, aumentando o disminuyendo el tiempo de degradación del material. Así este tipo de películas pueden ser usadas en el tratamiento de aguas residuales, lodos contaminantes y separación de partículas, También la fabricación de biosensores [127], para los nuevos requerimientos médicos, y desarrollo de biotecnologías e ingeniería.

Referencias

- [1] A. Martínez-Gil, E. Cadahía, B. F. de Simón, G. Gutiérrez-Gamboa, I. Nevares, y M. del Álamo-Sanza, "Quercus humboldtii(Colombian oak): Characterisation of wood phenolic composition with respect to traditional oak wood used in oenology", *Ciência técnica vitivinícola*, vol. 32, núm. 2, pp. 93–101, 2017.
- [2] A. Avella Muñoz, L. Cárdenas Camacho, "Conservación y uso sostenible de los bosques de roble en el corredor de conservación cuantitativa - la rusia - iguaque, departamento de Santander y Boyacá, Colombia", *Colombia forestal*, vol. 13, núm. 4, pp. 379-387, 2004.
- [3] "Política nacional de cambio climático", Ministerio de ambiente, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://corpoquajira.gov.co/wp/wp-content/uploads/2017/07/politica-nal-CC-2016.pdf>.
- [4] C. B. L. Boluarte Loayza y J. M. Rosado Noriega, "Análisis del sector de productos químicos para la fabricación de papel en Perú", Tesis Magistral, Universidad de Piura, Lima, 2019. Accedido el 9 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4375/MDE_1956.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [5] H. Y. Chura Teves y R. U. R. Sánchez Vázquez, "El impacto ambiental del ciclo de vida del papel en el Perú", Trabajo de investigación, UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN, Lima, 2020.
- [6] A. E. Cortez Vega, "ELABORACIÓN DE PAPEL A BASE DE RESIDUOS DE BANANO", Trabajo de Grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2014.
- [7] I. Plazonić, Ž. Barbarić-Mikočević, I. Bates, y L. Malnar, "Chemical stability of prints made on hemp fibre based papers", *ACTA GRAPH. J. Print. Sci. Graph. Commun.*, vol. 27, núm. 3, pp. 25–30, 2016.
- [8] T. Kobayashi y L. Nakajima, "Sustainable development goals for advanced materials provided by industrial wastes and biomass sources", *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 28, núm. 100439, p. 100439, 2021.
- [9] "Sector papelerero en Colombia crece y se destaca por su compromiso con el desarrollo sostenible", *ANDI MÁS PAÍS*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.andi.com.co/Home/Noticia/3294-sector-papelerero-en-colombia-crece-y-se-d>.
- [10] "Bioforest", *Arauco*, (s. f). [En línea]. Disponible en: <https://www.arauco.cl/chile/investigacion/investigacion/>.
- [11] "Sustentabilidad", *Bio Pappel*, (s. f). [En línea]. Disponible en: <https://www.biopappel.com/es/sustentabilidad>.
- [12] A. Salas Ruiz y M. M. Barbero Barrera, "Implementación de tecnologías constructivas con fibras vegetales que sean sostenibles en contextos de precariedad", en IV Congreso Internacional de Estudios del Desarrollo, Córdoba, España, 12–14 de diciembre de 2018. Universidad Politécnica de Madrid, 2018, p. 4.
- [13] G. A. Mejía Mesa y G. L. J. Santiago, "Los desechos generados por la industria bananera Colombiana", *Zonalogística*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://zonalogistica.com/los-desechos-generados-por-la-industria-bananera-colombiana/>.

- [14] W. Pérez Granados y M. Noreña Triana, “Indicadores e instrumentos cadena de plátano”, *Ministerio de agricultura y desarrollo rural*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Platano/Documentos/2018-10-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.
- [15] S. Chiappe Bueno, “Musa fibra de plátano”, Universidad de los Andes, Bogotá, 2019.
- [16] “Industria de pulpa, papel y cartón”, *ANDI MÁS PAÍS*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.andi.com.co/Home/Camara/20-industria-de-pulpa-papel-y-carton>.
- [17] K. Niño Porras, “Este es el panorama del cultivo de plátano en Colombia”, *El campesino.co*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://elcampesino.co/este-es-el-panorama-del-cultivo-de-platano-en-colombia/>.
- [18] M. Mazzeo Meneses, L. A. Libardo, L. Mejía Gutiérrez, L. Guerrero Mendieta, y J. Botero López, “Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano en el departamento de Caldas”, *Revista Educación en ing*, vol. 9, núm. 1900–8260, pp. 128–139, abr. 2010.
- [19] C. Barba Pacheco, “Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC) a partir de pastas de plantas anuales”, *Universitat Rovira i Virgili*, 2002.
- [20] A. F. García Muñoz y C. E. Riaño Luna, “Extracción de celulosa a partir de la borra de café”, *Cenicafé*, vol. 50, núm. 3, pp. 205–214, 1999.
- [21] A. Magalhães, J. de Carvalo, G. Pereira, S. Grace, M. Candido, C. Jesus, y R. Soccol, “Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives”, *Biofpr*, vol. 13, núm. 6, pp. 1505–1519, 2019.
- [22] A. Sanz Tejedor, “Tecnología de la celulosa. La industria papelera”, *Química orgánica industrial*. [En línea]. Disponible en: *Química Orgánica Industrial*.
- [23] E. Álvares Cordoba, “Cultivo de plátano (Musa Paradisiaca)”, *Centro nacional de tecnología y agropecuaria y forestal*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.centa.gob.sv/>.
- [24] A. Vézina y M. Baena, “Morfología de la planta del plátano”, *Promusa*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.promusa.org/Morfolog%C3%ADa+de+la+planta+del+banano>.
- [25] H. Quispe Huyhua, “Producción de semilla vegetativa de plátano (Musa paradisiaca L.) en el VRAE a 710 msnm”, *Universidad nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho-Perú*, 2018.
- [26] E. Vergara Cantillo, “Origen e historia del plátano Musa Paradisiaca L”, *Por los libros*, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://apiciusysuslibros.blogspot.com/2010/12/origen-e-historia-del-platano-musa.html>.
- [27] S. L. Belalcázar Carvajal, “El cultivo de plátano (Musa AAB Simmonds) en el trópico”, 1991.
- [28] D. I. Lucana Masias, “Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica”, *Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú*, 2008.

- [29] G. M. Correa Pillajo y D. H. Túarez Navarrete, “Caracterización de un compuesto de madera plástica obtenido mediante extrusión y reforzado con polvo de bambú y nanoarcillas”, Escuela politécnica nacional, Quito, 2019.
- [30] V. H. Guerrero, J. Dávila, S. Galeas, P. Pontón, N. Rosas, V. Sotomayor, y C. Valdivieso, *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales*. Mallorca N24-275 y av. La Coruña: Imprefepp, 2011.
- [31] C. Gumeta Chavez, “Estudio del secado convectivo y de la extracción de celulosa a través del proceso organosolv a partir del agave atrovirens karw”, Instituto politécnico nacional, México, D.F., 2009.
- [32] D. C. Perugachi, “Desarrollo experimental de blends de polipropileno con fibras naturales lignocelulósicas”, Universidad politécnica salesiana, Cuenca, 2014.
- [33] A. Guarnizo Franco, P. Martínez Yépes, y H. Valencia Sanchez, “Pretratamiento de la celulosa y biomasa para la sacarificación”, *Scientia et technica*, vol. 2, núm. 42, pp. 284–289, 2009.
- [34] Y. Habibi, L. Lucia, y O. Rojas, “Cellulose nanocrystals; chemistry, self-assembly, and applications”, *chemical reviews*, vol. 110, núm. 6, pp. 3479–3500, 2010.
- [35] L. Garcia, E. Bollardo, D. Dopico, y D. Cordero, “Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar”, *ICIDCA*, vol. 47, núm. 1, pp. 57–63, 2013.
- [36] V. Kumar, P. Pathak, y N. Kant, “Wastepaper: an underutilized but promising source for nanocellulose mining”, *Waste*, vol. 102, pp. 281–303, 2020.
- [37] D. E. Carchi Maurat, “Aprovechamiento de los residuos agrícolas provenientes del cultivo de banano para obtener nanocelulosa”, Universidad de Cuenca, Cuenca-Ecuador, 2014.
- [38] F. H. Recio del bosque, *Química Orgánica*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A, 2013.
- [39] J. Pérez, J. Muñoz, T. de la Rubia, y J. Martínez, “Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview”, *International Microbiology*, vol. 5, pp. 53–63, 2002.
- [40] F. Girio, C. Fonseca, F. Carvalheiro, L. Duarte, S. Marques, y R. Bogel-Lukasik, “Hemicelluloses for fuel ethanol: a review”, *Bioresource Technology*, vol. 101, núm. 13, pp. 4775–4800, 2010.
- [41] A. Ebringerová, Z. Hromádková, y T. Heinze, “Hemicellulose”, en *Polysaccharides I*, T. Heinze, Ed. Berlín, Alemania: Springer, pp. 1–67, 2005.
- [42] S. Rivas Siota, “Valorización de hemicelulosas de biomasa vegetal”, Universidad de Vigo, Orense, 2014.
- [43] F. Souca, G. Martínez, A. Oliveira, C. Aguilar, R. Azevedo, “Perspectivas biotecnológicas de hemicelulosas vegetales”, *Revista científica de la universidad autónoma de Coahuila*, vol. 2, núm. 4, pp. 1–7, 2010.
- [44] C. Laine, “Structures of hemicelluloses and pectins in wood and pulp”, Helsinki University of technology, Finland, 2005.

- [45] A. Ferrer, "Aprovechamiento integral del residuo de la industria del aceite de palma (EFB). Obtención de derivados de las hemicelulosas, pastas celulósicas y celulosa nanofibrilar", Universidad de Córdoba, España, 2013.
- [46] A. Pineda y J. Rivadeneira, "Obtención de celulosa microcristalina a partir de la fibra de estopa de coco", Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [94] V. Ureta y L. Alfredo, "Estandarización del proceso de fabricación de papel kraft en la máquina papelera N° 2 de la empresa Trupal", Universidad Tecnológica del Perú, 2017.
- [48] "Fabricación de papel", *Academia.edu*, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/5671110-Fabricacion-de-papel-soporte-tecnico-de-los-papeles-para-sca-publication-papers.html>.
- [49] Ministerio de energía y minas, "Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético industria papelera", 2016.
- [50] S. Mishra, P. Kharkar, y A. Pethe, "Biomass and waste materials as potential sources of nanocrystalline cellulose: comparative review of preparation methods (2016- Till date)", *Carbohydrate polymers*, vol. 207, pp. 418–427, 2019.
- [51] M. E. Vallejos y M. C. Area, *Producción y usos de la celulosa nanofibrilar y microfibrilada*. Iberoamérica: CYTED-NANO CELIA, 2019.
- [52] A.E. Cortez Vega, "Elaboración de papel a base de residuos de banano", Universidad católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador, 2014.
- [53] "Elaboración de papel con pinzote de banano como materia prima", *Eskulan.com*, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://eskulan.com/2011/09/30/elaboracion-de-papel-con-pinzote-de-banano-como-materia-prima/>.
- [54] A.M. Herrera Robles, "Elaboración del papel orgánico a base de pseudotallo de banano, cantón Santa Rosa, provincia de El Oro", Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2019.
- [55] Y. A. Vargas Corredor y L. I. Peérez Pérez, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente", *Revista facultad de ciencias*, vol. 14, núm. 1, pp. 59–72, 2018.
- [56] A. Nair y R. Joseph, "Eco-friendly bio-composites using natural rubber (NR) matrices and natural fiber reinforcements", en *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber*, S. Kohjiya y Y. Ikeda, Eds. Elsevier, 2014, pp. 249–283.
- [57] A.N. Salinas Castro y J.J. Huanaco Pariona, "Compósitos reforzados con fibras naturales", Universidad científica del Sur, Lima-Perú, 2020.
- [58] E. Espino, M. Cakir, S. Domenech, A. Román, N. Belgacem, y J. Bras, "Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from industrial by-products of Agave tequilana and barley", *Industrial crops and products*, vol. 62, pp. 552-559, 2014.
- [59] C. de Torres Frago, "Caracterización del potencial aromático de manzanas autóctonas aragonesas", Universidad Zaragoza, España, 2021.
- [60] C. E. Quiñones Cerna, "Residuos agroindustriales de alcachofa y espárrago como sustrato para la producción de celulosa bacteriana por *Komagata Eibacter xylinus*", Universidad de Trujillo, Perú, 2021.

- [61] C. Saurabh, A. Mustapha, M. Masri, A. Owolabi, M. Syakir, R. Dungani, M. Paridah, M. Jawaid, y H. Abdul, "Isolation and characterization of cellulose nanofibers from *gigantochloa scortechinii* as a reinforcement material", *Journal of nanomaterials*, vol. 2016, pp. 8, 2016.
- [62] J.F. Aguirre Cadena, "Contribución de bambusa spp. al sistema de producción campesina en la sierra nororiental de Puebla, México", Colegio de postgraduados, Puebla-México, 2018.
- [63] G. Bolio, A. Valadez, L. Veleza, y A. Andreeva, "Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: obtención y caracterización", *Revista Mexicana de ingeniería química*, vol. 10, núm. 2, 2011.
- [64] S. Mueller, C. Weder, y E. Foster, "Isolation of cellulose nanocrystals from pseudostems of banana plants", *Royal Society of chemistry*, vol. 4, núm. 2, pp. 907-915, 2013.
- [65] A. Pereira, D. Nascimento, M. Filho, J. Morais, F. Vasconcelos, A. Feitosa, A. Brígida, y M. Rosa, "Improvement of polyvinyl alcohol properties by adding nanocrystalline cellulose isolated from banana pseudostems", *carbohydrate polymers*, vol. 112, pp. 165-172, 2014.
- [66] S. Ferrer Cutanda, "Obtención de fibras de celulosa de cascara de arroz y café e incorporación a films de almidón termoplástico", Universidad politécnica de Valencia, España, 2018.
- [67] Y. Piñero Castro, "Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia", Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, 2014.
- [68] P. Lu y Y. Hsieh, "Preparation and properties of cellulose nanocrystals: rods, spheres, and network", *Carbohydrate polymers*, vol. 82, núm. 2, pp. 329-336, 2010.
- [69] J. Durán, A. Figueredo, y J. Dustet, "Características de la hidrodinámica de un biorreactor industrial tipo tanque agitado", *Revista Mexicana de ingeniería química*, vol. 13, núm. 3, 2014.
- [70] V. Castillo Uribe, "Diseño y cálculo de un agitador de fluidos", Universidad del Bío-Bío, Chile, 2013.
- [71] "Single-use bioreactors", *Sartorius*. [En línea]. Disponible en: <https://www.sartorius.com/en/products/fermentation-bioreactors/single-use-bioreactors>.
- [72] "Biorreactor de mesa bio-tec-pro-II", *Tecnal*. [En línea]. Disponible en: <https://tecnal.com.br/es/produtos/detalhes/12343 biorreactor de mesa>.
- [73] J. L. Nuñez Estrella y T. de J. Udeos Zabala, "Diseño, construcción y operación de un reactor batch para saponificar", Escuela superior politécnica del Litoral, Guayaquil, 2015.
- [74] F. J. G. Morales, "Diseño de un reactor batch termo-controlado para la elaboración de herbicidas líquidos a base de glifosato, utilizando datos fisicoquímicos y termodinámicos", Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2016.
- [75] S. F. H. Mayano y I. F. H. Chávez, "Diseño y construcción de un reactor de flujo en pistón", escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2012.

- [76] J. A. G. Quiroz, "Diseño de un reactor químico para la obtención de tolueno por deshidrogenación de metilciclohexano", Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas, ciudad de México, 2018.
- [77] J. C. S. Ulloa, "Diseño y construcción de un reactor híbrido tipo batch para la producción de biocombustibles: biodiésel y bioetanol como caso de estudio", Universidad autónoma de Nuevo León, Nuevo León, 2017.
- [78] J. C. C. Aguilar, "diseño y construcción de un reactor tipo batch para el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ciencias ambientales de la universidad internacional SEK", Universidad internacional SEK, Ecuador, 2013.
- [79] A. J. E. Guerrero y P. G. P. Paredes, "Diseño y construcción de un reactor batch para la obtención por transesterificación de biodiesel a partir de aceite de cocina reciclado", Escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2009.
- [80] N. A. L. Lincango, "Diseño de un reactor tipo batch para la obtención de biodiesel a partir de aceite de ricino (*Ricinus Communis*)", Escuela politécnica nacional, Quito, 2015.
- [81] "Volumen del casquete esférico", *Superprof*, 2014. [en línea]. disponible en: <https://www.superprof.es/diccionario/matematicas/geometria/volumen-casquete.html>.
- [82] P. L. E. Henríquez, "Diseño, simulación y control automático de temperatura para reactores batch en producción de resinas", Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 2008.
- [83] W. I. McCabe, J. C. Smith, y P. Harriot, Operaciones unitarias en ingeniería química. McGraw-Hill Interamericana S.A, 2007.
- [84] "Compresión", *Materials & Design*, 27-mar-2015. [En línea]. Disponible en: <https://materialsdesign.wordpress.com/compresion/>.
- [85] M. Beltrán Rico y A. Marcilla Gomis, Tecnología de polímeros. procesado y propiedades. Universidad de Alicante, servicio de publicaciones, 2012.
- [86] R.I. Cabezas Arevalo, "Diseño de un sistema de compactación de biomasa de cascarilla de arroz y serrín, en la producción de bloques sólidos combustibles (BSC)", Escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2009.
- [87] E.D. Valles Peralta, "Diseño y construcción de una máquina de moldeo por termocompresión automatizada para recubrir discos-pesos de hierro fundido", Universidad técnica del norte, Ibarra-Ecuador, 2019.
- [88] E.H. Cataño Rueda, "Obtención y caracterización de nanofibras de celulosa a partir de desechos agroindustriales", Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009.
- [89] J. Morán, V. Alvarez, V. Cyras, y A. Vazquez, "Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers", *cellulose*, vol.15, pp. 149-159, 2008.
- [90] J.X. Sun, X.F. Sun, H. Zhao, y R.C. Sun, "Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse", *Polymer degradation and stability*, vol. 84, núm 2, pp. 331-339, 2004.
- [91] S. Huang, L. Zhou, M. Chun Li, W. Quinglin, y D. Zhou, "Cellulose nanocrystals CNCs from corn stalk: activation energy analysis", *MDPI materials*, vol. 10, núm. 80, pp. 1-13, 2017.

- [92] O. O. Ogunleye, M. A. Ajala, y S. E. Agarry, "Evaluation of biosorptive capacity of banana (*Musa paradisiaca*) stalk for lead (II) removal from aqueous solution", *J. Environ. Prot. (Irvine Calif.)*, vol. 05, núm. 15, pp. 1451–1465, 2014.
- [93] R. Zuluaga, J.-L. Putaux, A. Restrepo, I. Mondragón, y P. Gañán, "Cellulose microfibrils from banana farming residues: isolation and characterization", *Cellulose*, vol. 14, núm. 6, pp. 585–592, 2007.
- [94] P. E. Imoisili, S. O. O. Olusunle, A. V. Popoola, y A. E. Okoronkwo, "Effect of alkaline treatment on the macromolecular, thermal, and crystallographic structures of plantain (*Musa paradisiaca*) fibers", *Lignocellulose*, vol. 6, núm. 2, pp. 88–97, 2017.
- [95] A. Patra y D. K. Bisoyi, "Investigation of the electrical and mechanical properties of short sisal fiber-reinforced epoxy composite in correlation with structural parameters of the reinforced fiber", *J. Mater. Sci.*, vol. 46, núm. 22, pp. 7206–7213, 2011.
- [96] M. Esmeraldo, A. Barreto, J. Freitas, P. Fachine, A. Sombra, E. Corradini, G. Mele, A. Maffezzoli, y S. Mazzetto, "Dwarf-green coconut fibers: versatile natural renewable raw bioresource. treatment morphology and physicochemical properties", *Bioresources*, vol. 5, pp. 478-501, 2010.
- [97] A. C. H. Barreto, D. S. Rosa, P. B. A. Fachine, y S. E. Mazzetto, "Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, núm. 5, pp. 492–500, 2011.
- [98] Y. Contreras-Valero, Y. Cardona-Rodríguez, y D. A. Torres-Sánchez, "Estudio térmico e infrarrojo de cinco tipos de madera comercializadas en norte de santander, para su posible uso como fuente de energía", *Respuestas*, vol. 22, núm. 2, pp. 36–47, 2017.
- [99] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, y C. Zheng, "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis", *Fuel (Lond.)*, vol. 86, núm. 12–13, pp. 1781–1788, 2007.
- [100] E. N. Nudel, G. V. Olmos, A. V. Devard, F. A. Marchesini, y M. C. Taleb, "Desarrollo de catalizadores de cobre soportados sobre esferas de celulosa para eliminar contaminantes emergentes en agua", *Rumbos tecnológicos*, vol. 12, pp. 63–72, 2020.
- [101] D. R. Biswal y R. P. Singh, "Characterisation of carboxymethyl cellulose and polyacrylamide graft copolymer", *Carbohydr. Polym.*, vol. 57, núm. 4, pp. 379–387, 2004.
- [102] E. Rodríguez, G. Jiménez, M. Contreras, A. Valbuena, y M. Colina, "Obtención y caracterización de la carboximetil celulosa a partir del pseudotallo de plátano *musa paradisiaca* (SP)", *Revista Iberoamericana de polímeros*, vol.12, pp. 317-323, 201.
- [103] M. Herrera, L. Sinche, y O. Bonilla, "Obtención de Nanocelulosa a partir de Celulosa de Puntas de Abacá", *Afinidad*, vol. 76, núm. 586, pp. 123–131, 2019.
- [104] R. Prithvirajan, P. Narayanasamy, N. Al-Dhabi, P. Balasundar, R. Shyam, y K. Ponmurugan, "Characterization of *Musa paradisiaca* L. cellulosic natural fibers from Agro-discarded blossom petal waste", *J. Nat. Fibers*, vol. 17, núm. 11, pp. 1640–1653, 2020.
- [105] A. Paajanen y J. Vaari, "High-temperature decomposition of the cellulose molecule: a stochastic molecular dynamics study", *Cellulose*, vol. 24, núm. 7, pp. 2713–2725, 2017.
- [106] Z. Al-Maqdasi, R. Joffe, A. Ouarga, N. Emami, S. Singh, A. Landström, y A. Hajlane, "Conductive regenerated cellulose fibers for multi-functional composites: Mechanical and structural investigation", *Materials (Basel)*, vol. 14, núm. 7, p. 1746, 2021.

- [107] M. Broche, I. Rodríguez, Y. Coca, y M. Calero, “Caracterización de los residuos agrícolas del sorgo para su uso como materiales biosorbente de colorantes”, *Centro azúcar*, vol. 45, pp. 64–75, 2018.
- [108] E. Álzate Carvajal, V. D. Quintero Castaño, y J. C. Lucas Aguirre, “Determinación de las propiedades térmicas y composicionales de la harina y almidón de chachafruto (*erythrina edulis triana ex micheli*)”, *Temas Agrarios.*, vol. 18, núm. 2, pp. 21–35, 2013.
- [109] C. R. M. José, “Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes”, Universidad autónoma de Nuevo León, México, 2012.
- [110] H. Tibolla, F. M. Pelissari, J. T. Martins, A. A. Vicente, y F. C. Menegalli, “Cellulose nanofibers produced from banana peel by chemical and mechanical treatments: Characterization and cytotoxicity assessment”, *Food Hydrocoll.*, vol. 75, pp. 192–201, 2018.
- [111] C. Blasco, “Evaluación de los recursos agrícolas para su valorización energética en valderas spouted bed reactors”, Universidad de Valencia, España, 2018.
- [112] C. S. Navas, M. M. Reboredo, y D. L. Granados, “Comparative Study of Agroindustrial Wastes for their use in Polymer Matrix Composites”, *Procedia Mater. Sci.*, vol. 8, pp. 778–785, 2015.
- [113] A. F. Díaz-Oviedo, B. A. Ramón-Valencia, y G. G. Moreno-Contreras, “Caracterización fisicoquímica de la cáscara de mazorca de cacao como posible uso en la elaboración de tableros aglomerados”, *Revista investigación, desarrollo e innovación*, vol. 12, núm. 1, pp. 97–106, 2022.
- [114] F. M. Pelissari, P. J. do A. Sobral, y F. C. Menegalli, “Isolation and characterization of cellulose nanofibers from banana peels”, *Cellulose*, vol. 21, núm. 1, pp. 417–432, 2014.
- [115] M. Dhia, “Estudios de fuentes alternativas a la madera para la obtención de la celulosa”, Universidad politécnica de Valencia, España, 2021.
- [116] A. Parra Campos, “Extracción e incorporación de micro partículas de bagazo de fique en un material obtenido a partir de almidón de yuca”, Universidad nacional de Colombia, Palmira, 2020.
- [117] D. Ponce, “Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural”, Escuela politécnica nacional, Quito-Ecuador, 2011.
- [118] A. F. Tarchoun, D. Trache, T. M. Klapötke, M. Derradji, y W. Bessa, “Ecofriendly isolation and characterization of microcrystalline cellulose from giant reed using various acidic media”, *Cellulose*, vol. 26, núm. 13–14, pp. 7635–7651, 2019.
- [119] R. H. Pérez, A. Olarte Paredes, R. Salgado Delgado, A. M. Salgado Delgado, A. S. Medrano, y F. R. Martínez Candia, “Manejo de la cascarilla de arroz como residuo postcosecha y su conversión en nanocelulosa”, *Mundo Nano Rev. Interdiscip. Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 16, núm. 30, pp. 1e–17e, 2022.
- [120] P. McKendry, “Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass”, *Bioresour. Technol.*, vol. 83, núm. 1, pp. 37–46, 2002.
- [121] H. Contreras, H. Trujillo, G. Arias, J. Perez, y E. Delgado, “Espectroscopía ATR-FTIR de celulosa: aspecto instrumental y tratamiento matemático de espectros”, *e-Gnosis*, vol. 8, pp. 1–13, 2010.

- [122] A. Demirbas, "Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: a review", *J. Hazard. Mater.*, vol. 157, núm. 2–3, pp. 220–229, 2008.
- [123] F. Jiang y Y.-L. Hsieh, "Chemically and mechanically isolated nanocellulose and their self-assembled structures", *Carbohydr. Polym.*, vol. 95, núm. 1, pp. 32–40, 2013.
- [124] C.J. Gamarra Altahona, "Caracterización de aceite y cascarilla procedentes de la semilla sachá inchi (*Plukenetia Volubilis*) para aplicaciones en la industria petroquímica", Universidad de Santander, Bucaramanga, 2022.
- [125] J. Ledesma Garcia, "Preparación y caracterización de membranas de intercambio iónico a partir del anclaje de dendrímeros PAMAM en una base polimérica de acetato de celulosa", Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica", México, 2004.
- [126] P. Landa-Salgado, "Nanotecnología en la industria alimentaria: bionanocompuestos en empaques de alimenticios ", *AP*, vol. 10, núm. 10, 2017.
- [127] A. Luna y L. Antonio, "Obtención y estudio de nanocompositos a base de Nanotubos de carbono multicapa alineados y no alineados para futuras aplicaciones en los biosensores", Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017.
- [128] "FICHA DE SEGURIDAD SOSA CÁUSTICA LÍQUIDA 50%", *Ascanio química*, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecosmep.com/cabecera/upload/fichas/7421.pdf>.
- [129] J. Chen, Y. Wang, H. Hu, y H. Liu, "Application of sodium chlorite and sulfuric acid to generate chloride dioxide for the bleaching of hardwood kraft pulp", *Bioresources*, vol. 10, núm. 3, pp. 4147-4155, 2015.