

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

PROGRAMA DE MAESTRIA EN QUÍMICA COHORTE 2021

Tema: Diseño de un sistema de recuperación de fibra celulósica a partir de corrientes de desperdicio, generadas en la elaboración de papel tissue, en la línea de producción número cinco de Grupo Familia, planta Lasso, Ecuador

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en Química.

Modalidad del Trabajo de Titulación: Proyectos de Desarrollo.

Autor: Ingeniero, Miguel Angel Pilco Toscano.

Director: Químico, Lander Vinicio Pérez Aldás Mg.

Ambato – Ecuador

2023

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por: Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia Magister, e integrado por los señores: Ingeniera Nelly del Pilar Pazmiño Miranda Magister y Química Marcia Eduvijes Buenaño Sánchez Magister., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “Diseño de un sistema de recuperación de fibra celulósica a partir de corrientes de desperdicio, generadas en la elaboración de papel tissue, en la línea de producción número cinco de Grupo Familia, planta Lasso, Ecuador” elaborado y presentado por el señor Ingeniero Miguel Ángel Pilco Toscano, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Química; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal

Ing. Nelly del Pilar Pazmiño Miranda Mg.
Miembro del Tribunal

Quím. Marcia Eduvijes Buenaño Sánchez Mg.
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Diseño de un sistema de recuperación de fibra celulósica a partir de corrientes de desperdicio, generadas en la elaboración de papel tissue, en la línea de producción número cinco de Grupo Familia, planta Lasso, Ecuador” le corresponde exclusivamente a: Ing. Miguel Angel Pilco Toscano, Autor bajo la Dirección de Quím. Lander Vinicio Pérez Aldás Mg., Director del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Miguel Angel Pilco Toscano

c.c.: 0202412052

AUTOR

Quím. Lander Vinicio Pérez Aldás Mg.

c.c.: 1802706596

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Miguel Angel Pilco Toscano
c.c.: 0202412052

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA	i
A la Unidad Académica de Titulación.....	ii
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1. General	4
1.3.2. Específicos.....	4
CAPITULO II.....	5
MARCO TEORICO	5
2.1. Proceso de fabricación de papel Tissue.....	5
2.2. Electrocinética del proceso de elaboración de papel	6
2.3. Generación de cargas en las suspensiones fibrosas	9
2.3.1. Origen de la carga en la pasta papelera	11
2.3.2. Formación de grupos de ácido carboxílico.....	12
2.4. Potencial Zeta ζ	13
2.4.1. Determinación de potencial zeta.....	13
2.4.2. Potencial zeta en el proceso de elaboración de papel.....	16
2.5. Demanda de carga iónica	18
2.5.1. Importancia de medición de demanda de carga iónica en el proceso papelero	19
2.5.2. Control de carga aniónica	20
2.5.3. Principios de determinación de demanda de carga	21
2.6. Recuperación de fibras celulósicas	22
CAPITULO III	26
MARCO METODOLÓGICO	26
3.1. Tipo de investigación	26
3.2. Población o muestra:	26
3.3. Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender	27
3.3.1. Planteamiento hipótesis	28
3.4. Recolección de información:	28
3.5. Equipos y Materiales.....	28

3.6. Procesamiento de la información y análisis estadístico:	35
CAPITULO IV	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Resultados de variables electrocinéticas y análisis estadístico:.....	38
4.1.1. Potencial Zeta.....	38
4.1.1.1. Prueba de normalidad	39
4.1.1.2. Prueba t.....	40
4.1.2. Demanda de carga	41
4.1.2.1. Prueba de Normalidad	43
4.1.2.2. Prueba t	43
4.2. Blancura.....	44
4.3. Balance de fibra recuperada	46
4.3.1. Determinación flujo másico.....	46
4.3.2. Determinación fibra útil.....	47
4.4. Diseño del sistema de recuperación de fibra	47
4.4.1. Equipo recuperador de fibra	48
4.4.2. Diseño del sistema de bombeo al equipo recuperador de fibra	49
CAPÍTULO V	53
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.	53
5.1. Conclusiones.....	53
5.2. Recomendaciones	54
CAPÍTULO VI.....	56
PROPUESTA	56
6.1. Título	56
6.2. Descripción.....	56
6.2.1. Flujo de filtrados tornillos espesadores.....	56
6.2.2. Sistema de bombeo.....	56
6.2.3. Equipo recuperador de fibra	56
6.2.4. Flujo aceptado y filtrado.....	57
6.2.5. Diagrama de flujo.....	57
6.3. Desarrollo de la propuesta	58
6.3.1. Cronograma	58
Bibliografía.....	59
Anexos	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Puntos de muestreo.....	27
Tabla 2. Equipos utilizados para los análisis desarrollados durante el estudio	29
Tabla 3. Reactivos para medición de demanda de carga iónica	31
Tabla 4. Metodologías utilizadas durante el desarrollo de la investigación.....	32
Tabla 5. Valores de potencial zeta para las diferentes corrientes de desperdicio.	38
Tabla 6. Resultados de pruebas de normalidad de valores de potencial zeta.....	40
Tabla 7. Resultados prueba t potencial zeta	41
Tabla 8. Valores de demanda de carga iónica para las diferentes corrientes de desperdicio	42
Tabla 9. Resultados de pruebas de normalidad de valores de demanda de carga iónica.....	43
Tabla 10. Resultados prueba t demanda de carga iónica	44
Tabla 11. Valores de blancura para cada corriente de desperdicio.....	45
Tabla 12. Datos base para el desarrollo del balance de masa.....	46
Tabla 13. Flujo másico de las corrientes de desperdicio.....	47
Tabla 14. Cantidad de fibra útil recuperable	47
Tabla 15. Características equipo recuperador de fibra.....	48
Tabla 16. Datos base para el cálculo de velocidad de flujo hacia el equipo recuperador de fibra.....	49
Tabla 17. Pérdidas por accesorios en el sistema de bombeo de la corriente de desperdicio hacia el recuperador de fibra	50
Tabla 18. Cronograma de actividades para el desarrollo del sistema de recuperación de fibra	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso general de elaboración de papel	6
Figura 2. Pasos sucesivos de formación de puentes de hidrógeno interfibrilares ..	7
Figura 3. Constituyentes en una suspensión fibrosa.....	8
Figura 4. Doble capa eléctrica en suspensión fibrosa.....	10
Figura 5. Cargas presentes en la suspensión fibrosa.....	12
Figura 6. Capas eléctricas en la fibra de celulosa.....	14
Figura 7. Esquema de un equipo de análisis de potencial zeta por migración electroforética.....	15
Figura 8. Equipo actual para medición de potencial zeta	16
Figura 9. Ambiente electrocinética en una partícula coloidal.....	18
Figura 10. Equipo para medición de demanda de carga iónica.....	21
Figura 11. Esquema de medición de demanda de carga iónica en una celda Mutek	22
Figura 12. Blancura de papel en las diferentes muestras obtenidas de las corrientes de desperdicio.....	45
Figura 13. Hojas de laboratorio formadas con las muestras de las corrientes de desperdicio	46
Figura 14. Equipo recuperador de fibra celulósica.....	48
Figura 15. Diagrama de proceso del sistema de recuperación de fibra	52
Figura 16. Diagrama de flujo para propuesta de sistema de recuperación de fibra	57

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por brindarme sabiduría y permitirme lograr un paso más en mi formación académica.

A mi familia, por todo el apoyo incondicional que siempre me han sabido brindar.

A todas las personas que contribuyeron en el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres, Faideé
Angélica y Miguel
Angel, con su brillo
han iluminado todos
mis pasos y con su
amor infinito me han
dado fuerzas para
siempre continuar
adelante, esto es por
ellos y para ellos.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN QUÍMICA
COHORTE 2021

TEMA:

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE FIBRA CELULÓSICA A PARTIR DE CORRIENTES DE DESPERDICIO, GENERADAS EN LA ELABORACIÓN DE PAPEL TISSUE, EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NÚMERO CINCO DE GRUPO FAMILIA, PLANTA LASSO, ECUADOR”

MODALIDAD DE TITULACIÓN: Proyectos de Desarrollo

AUTOR: Ing. Miguel Angel Pilco Toscano

DIRECTOR: Quím. Lander Vinicio Pérez Aldás Mg.

FECHA: Veintiséis de octubre de dos mil veintitrés.

RESUMEN EJECUTIVO

Los procesos industriales son una de las fuentes más representativas en el aspecto de la contaminación ambiental, por ello cada vez se desarrollan más compromisos medioambientales procurando reducir o reutilizar los residuos generados en estos procesos. Ligado a esta última mención, la presente investigación, busca diseñar un sistema de recuperación de fibra celulósica a partir de cuatro corrientes de desperdicio, las cuales son rechazo de proceso de limpieza a baja consistencia (rechazo screen), filtrado de tornillos y tambores espesadores (filtrado espesadores), lodos generados en el proceso de destintado (rechazo destintado) y filtrado del proceso de formación de papel (agua blanca máquina), para ello nos hemos enfocado en dos ejes principales. En primer lugar, se evaluó el comportamiento electrocinético de estos residuos, analizando su potencial zeta y demanda de carga iónica, los mismos que fueron comparados con los datos obtenidos de los análisis de pulpa de celulosa que se utilizan para el proceso de elaboración de papel. Mediante el respectivo análisis estadístico de medias muestrales, se definió las corrientes de desperdicio que mejor se adaptan a este proceso, con valores de potencial zeta promedio de -18mV y demanda de carga de $-168\mu\text{eq/L}$. El otro enfoque estuvo ligado a la evaluación de la cantidad de fibra útil a recuperarse, en este caso se tomó en cuenta dos variables importantes, la consistencia o concentración de fibra presente en las muestras y la cantidad de cenizas de las mismas. Con estos datos se desarrolló el respectivo balance de masa para definir la corriente de desperdicio que presentaba mayor rédito de recuperación para su posterior diseño, en este caso se observa que existe un flujo másico posible de recuperación de $19,44\text{ T/día}$ con la corriente de filtrado de espesadores, siendo este el valor más alto. Finalmente, con todos los datos obtenidos y su respectivo análisis, se definió la corriente de desperdicio que se adapta de mejor manera al proceso; en base al objetivo del estudio se procedió con el diseño del sistema de recuperación constando de un sistema de bombeo y un equipo recuperador de fibra.

DESCRIPTORES: CELULOSA, DEMANDA DE CARGA, FIBRA, PAPEL,
POTENCIAL ZETA, PULPA, RECUPERACIÓN.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El desperdicio de fibra celulósica es uno de los principales indicadores evaluados en la industria de producción de papel tissue, este valor se encuentra ligado a dos aspectos fundamentales, el primero, la pérdida de eficiencia y rendimiento de su proceso y aún más importante, la generación de residuos de fibra en forma de lodos, es por ello que en este trabajo se plantea el diseño de un sistema de recuperación de fibra celulósica a partir de las corrientes de desperdicio que se generan como parte del proceso de limpieza y preparación de pasta.

Para cumplir con el objetivo planteado, se ha identificado cuatro puntos específicos en el proceso productivo, donde existe generación de residuos celulósicos. A partir de aquí se ha desarrollado el muestreo de las corrientes y los respectivos análisis de laboratorio que incluyen morfología, consistencia, pH y el análisis electrocinético de la fibra, lo que ha permitido determinar de manera adecuada si es factible la reinsertión de estas corrientes hacia el proceso productivo sin alterar la estabilidad del proceso y generar los beneficios esperados.

El tema que ha sido abordado con mayor relevancia en este estudio ha sido el análisis electrocinético de la fibra potencialmente reutilizada, específicamente el potencial zeta y la demanda de carga iónica, esto debido a la importancia que juegan estos dos factores en el proceso de formación de papel. Se ha abordado toda la teoría ligada a estas dos variables con la finalidad de elegir de manera adecuada la mejor corriente de desperdicio que genere el mayor rédito al proceso y medioambiente.

A partir de los análisis realizados se ha podido determinar la utilidad de la fibra y mediante el respectivo balance de masa se ha podido definir la corriente con mayor cantidad de fibra recuperada para el desarrollo de la inversión que supone desarrollar el sistema de recuperación de fibra.

Como parte de las principales limitaciones se ha encontrado la falta de investigaciones ligadas a la calidad electrocinética de residuos generados en el proceso de elaboración de papel ya sea para su reciclaje o recuperación. Es ahí donde radica la importancia de este estudio con la finalidad de aplicarlo a futuros proyectos ligados al campo de la industria de pulpa y papel.

1.2 Justificación

En los últimos años, la tendencia de la economía circular ha venido ganando más adeptos, y a la par de este surgimiento, ha nacido la responsabilidad social ambiental por parte de las empresas manufactureras. En esta línea se ubica perfectamente la industria de producción de papel y cartón, la misma que hace uso de material reciclado como principal fuente de materias primas. De acuerdo a datos recolectados por el Bureau of International Recycling (BIR), se estima que en el año 2018 más del 50% de la producción de papel y cartón se fabricó haciendo uso de fibras recicladas (BIR, 2019).

Tomando como base lo anteriormente expuesto, se debe tener en cuenta que el porcentaje restante de materias primas usadas en la elaboración de papel, parte del uso de fibras vírgenes, obtenidas por procesos de digestión de madera, lo que conlleva a incrementar prácticas de deforestación, sumado a esto se debe considerar el costo elevado de este tipo de fibras (Becerra, 2021)

Unido a ello, la paralización de actividades humanas del periodo de pandemia generó fuertes recesiones en la captación de materiales reciclados provocando una reducción en la oferta para una alta demanda, la misma que debía ser cubierta con el incremento en

consumo de fibra virgen, lo que llevó a elevar el precio de esta materia prima, ya que, para continuar con la producción, las empresas de papel se veían obligadas a incrementar su consumo (Cabrero, 2021)

Ecuador no estuvo exento de esta tendencia mundial, siendo la empresa Familia-Sancela una de las más afectadas por la disminución en la captación de materias primas, ya que, en sus dos molinos papeleros ubicados en su planta de Lasso en la provincia de Cotopaxi, se genera un consumo de fibra reciclada que sobrepasa las tres mil toneladas al mes, que representa el 77% de este tipo de material reciclado a nivel nacional, cantidad que no se ha logrado captar en el mercado nacional y que debe ser cubierta con material reciclado importado, lo que implica el incremento de la huella de carbono del proceso de producción de papel, debido al transporte marítimo de estos materiales (Grupo Familia, 2021).

Este panorama obliga a buscar nuevas oportunidades de mejora en el proceso de elaboración de papel, de la empresa Familia-Sancela, con la finalidad de aprovechar los flujos de rechazo generados en el sistema de preparación de pasta, donde se ha observado que existe presencia de fibra que puede retornarse al proceso, reduciendo de esta forma la cantidad de residuos sólidos generados como parte del tratamiento previo a la disposición final que se realiza a estos rechazos, ya que actualmente se genera una disposición final de más de 50 ton/día de lodos en los que se incluye fibra que se ha retirado del proceso en etapas de limpieza y destintado.

Por este motivo, es indispensable desarrollar un estudio de recuperación de fibra celulósica presente en las corrientes de rechazo generadas en el proceso de preparación de pasta para la elaboración de papel tissue.

El presente proyecto contribuirá como base para que otras plantas dedicadas a la producción de papel puedan implementar un sistema similar que les permita obtener mejores resultados en el rendimiento de su proceso, minimizando la generación de

residuos sólidos y reduciendo el consumo de fibras vírgenes como materia prima de su proceso.

1.3 Objetivos

1.3.1. General

Diseñar un sistema de recuperación de fibra celulósica, a partir de corrientes de desperdicio del proceso de elaboración de papel tissue, en la línea de producción número cinco de Grupo Familia, planta Lasso, Ecuador.

1.3.2. Específicos

Determinar la cantidad de fibra útil que se puede recuperar de las diferentes corrientes de desperdicio.

Desarrollar el análisis de potencial zeta para las diferentes corrientes de desperdicio y fibra recuperada.

Desarrollar el análisis de demanda de carga iónica para los filtrados de las corrientes de desperdicio y fibra recuperada.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Proceso de fabricación de papel Tissue

El proceso de fabricación de papel tissue está conformado por varias etapas, entre ellas, preparación y manipulación de la materia prima, generación de pulpa, lavado y cribado de la pulpa, destintado por flotación, blanqueo y fabricación de papel.

La generación de pulpa reciclada o virgen se desarrolla de forma mecánica mediante un dispositivo denominado pulper. Posteriormente, para la limpieza de las fibras secundarias o recicladas, existe un proceso de cribado de materiales gruesos, generalmente piedras, grapas, alambres. Luego, se genera un proceso de destintado en celdas presurizadas o abiertas a la atmósfera. A continuación, existe procesos de limpieza de contaminantes pequeños como arenas, gomas, tintas, empleando equipos que separan estos materiales de la fibra mediante fuerzas centrifugas aprovechando los diferenciales de presión entre el ingreso y salida de la pasta. Finalmente, la pulpa pasa por un proceso de reacciones de blanqueo que puede ser de carácter oxidativo o reductivo (Bajpai, 2018)

La siguiente etapa es la elaboración de papel en la zona de la máquina papelera, en esta etapa, la pulpa, en forma de suspensión, se inyecta en la tela de formación para enviar la hoja formada a procesos de prensado y secado. El prensado se realiza mediante un rodillo giratorio con orificios que permiten el drenado del exceso de agua que contiene el papel. El secado se realiza de igual manera en un cilindro giratorio de acero en el cual se inyecta vapor a presión calentando el papel y evaporando el agua.

A continuación, se presenta un diagrama del proceso de elaboración de papel.

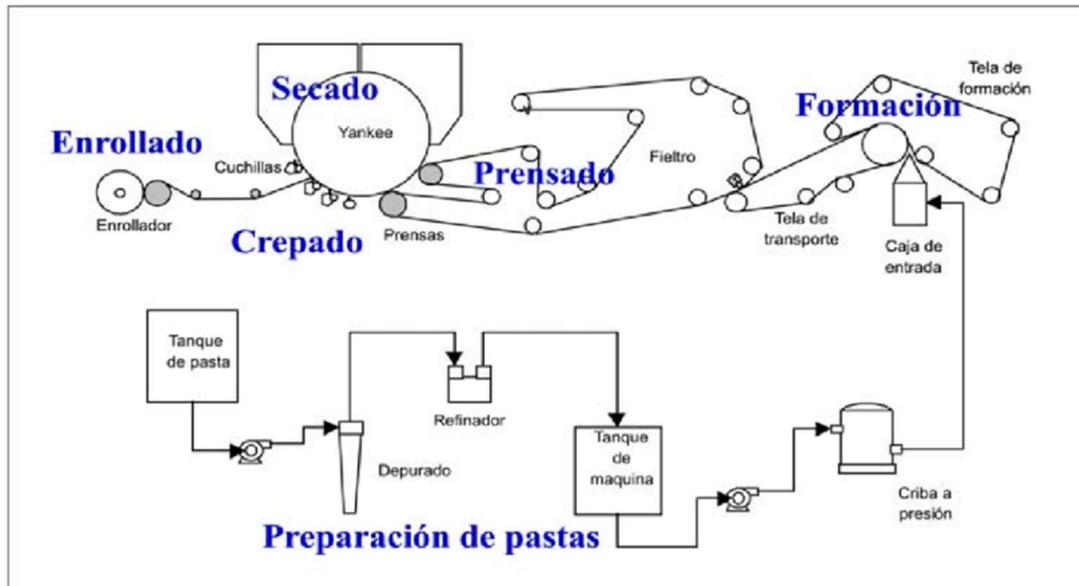


Figura 1. Proceso general de elaboración de papel

2.2. Electrocinética del proceso de elaboración de papel

La carga eléctrica en el proceso de fabricación de papel juega un papel destacado en la agregación de partículas y los efectos de varios aditivos. De hecho, la carga de fibra está fuertemente correlacionada con la formación y retención de finos y rellenos durante la consolidación de la red de celulosa en las operaciones de formación, prensado y secado, siendo sus efectos reflejados en las propiedades físicas del papel resultante (Cadena, et al., 2009).

Durante el proceso de formación y elaboración de papel tissue, se generan varias interacciones químicas que están regidas bajo una naturaleza coloidal y su comportamiento deriva principalmente de las fuerzas o cargas superficiales de la fibra de celulosa.

Las fibras del papel se unen entre sí mediante seis mecanismos de interacción que se encuentran claramente definidos, estos son: interdifusión, entrelazamiento mecánico, fuerzas capilares, fuerzas de Coulomb, fuerzas de Van der Waals y las más importantes,

puentes de hidrógeno. Dependiendo de estas interacciones se generará las características de resistencia del papel (Hirn & Schennach, 2015)

Debido a la naturaleza higroscópica de la celulosa, se define que los puentes de hidrogeno son las fuerzas principales que rigen el comportamiento del papel, estos se forman principalmente de la interacción fibra-fibra y fibra-agua mediante los grupos hidroxilo de la celulosa. Durante el proceso de formación y secado de la red fibrilar del papel, se genera la consolidación de su estructura, recordemos que el proceso inicia con una suspensión fibrosa de tipo coloidal. En un inicio las fibras se encuentran más separadas debido a la presencia de una alta cantidad de agua, a medida que el papel se va secando, la distancia entre fibras se va acortando, llegando a un punto en el que los átomos de agua que permanece van formando puentes entre los grupos hidroxilo de fibras contiguas convirtiéndose así en enlaces hidrogeno (Przybysz, et al., 2016)

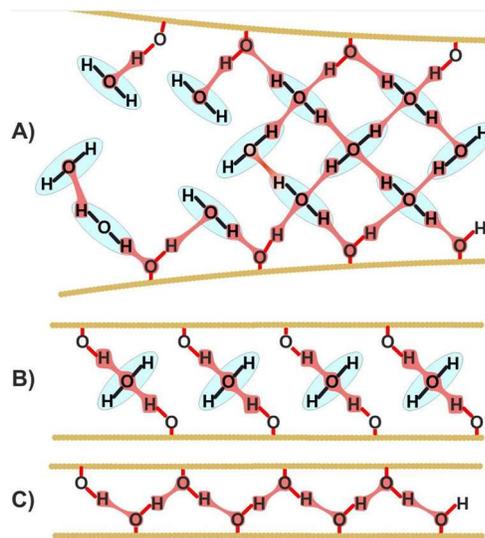


Figura 2. Pasos sucesivos de formación de puentes de hidrógeno interfibrilares

La suspensión de fibras para la fabricación de papel consta de una gran cantidad de componentes que se diferencian entre sí en varios aspectos, como tamaño, forma, área superficial, rugosidad superficial y carga eléctrica (Figura 3). La suspensión de fibras y

finos contiene carga mineral y aditivos que tienen como objetivo mejorar el proceso de fabricación del papel y sus propiedades. El material fibroso cuando se dispersa en medio acuoso desarrolla una carga superficial debido a la presencia de grupos funcionales ionizables como el hidroxilo y el carbonilo. Lo que resulta en la ineficiencia en la retención de partículas de naturaleza coloidal (como finos y rellenos) (Nascimento & Moreira, 2015).

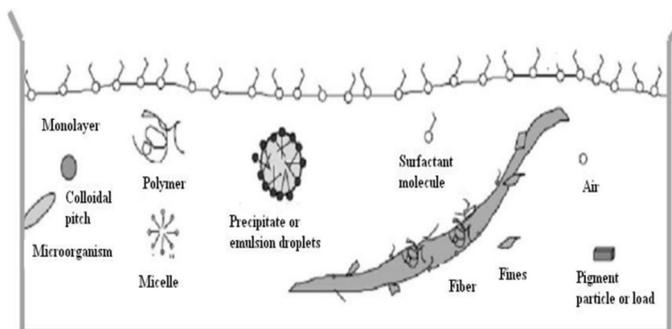


Figura 3. Constituyentes en una suspensión fibrosa

Las fibras celulósicas normalmente llevan una carga negativa cuando están suspendidas en agua debido a la presencia de grupos ácidos ionizables en las hemicelulosas y la lignina. La carga de las fibras es una función compleja de la composición química, el estado de ionización de los grupos ácidos y la naturaleza y cantidad de sustancias adicionales adsorbidas en la superficie de la fibra. La población de grupos ionizables depende del origen de las fibras y de los tratamientos químicos como el despulpado y el blanqueo. Las características de cualquier superficie de fibra en particular también dependen en gran medida del grado de tratamiento mecánico. El número de grupos cargados presentes depende del origen particular de las fibras y se espera que su distribución de carga varíe con los cambios en la morfología de las fibras (Nascimento & Moreira, 2015).

Se sabe que las hemicelulosas contienen grupos cargados negativamente en sus formas nativas, por lo que la generación adicional de una mayor cantidad de grupos de ácido carboxílico ionizable durante las reacciones de pulpeado y blanqueo aumenta su

condición aniónica (Mathews et al. 2004). El número de grupos cargados presentes depende del origen particular de las fibras y se espera que su distribución de carga varíe con los cambios en la morfología de la fibra (Bhardwaj et al. 2007).

La ionización de grupos ácidos sobre fibras celulósicas forma cargas que influyen en la formación del papel. Las interacciones químicas suministradas son complejas. La carga en los sistemas de fabricación de papel juega un factor importante a la hora de determinar la agregación de partículas y el efecto de los diferentes aditivos. El control de la retención de finos y cargas en el proceso de fabricación de papel es necesario por razones técnicas y económicas, ya que de él depende la mejora del refinado, la conservación del contenido de sólidos después del prensado y un menor consumo de vapor. Los factores hidrodinámicos juegan un papel importante en el proceso de retención junto con las fuerzas de interacción coloidal. Para mejorar la retención y el drenaje, normalmente se añaden a la pulpa flocculantes poliméricos solubles en agua. Estos incluyen polímeros naturales (almidón, carboximetilcelulosa y gomas) y flocculantes sintéticos (poliacrilamidas, aminas, poliaminas, poliamidas, óxido de polietileno)

2.3. Generación de cargas en las suspensiones fibrosas

Los sistemas coloidales de la elaboración de papel incluyen finos y fibras de celulosa, rellenos y pigmentos minerales, aditivos sintéticos y naturales, así también, material disuelto o coloidal procedente de las materias primas utilizadas. Estos sistemas coloidales, que se forman en una suspensión fibrosa en un medio acuoso, generan una doble capa eléctrica como se muestra en la figura 4. Las cargas se presentan en la superficie de las partículas, las cuales pueden ser originadas por la disociación de grupos iónicos como por ejemplo los grupos COOH⁻ de la celulosa o adsorción de iones como por ejemplo el Ca²⁺ en CaCO₃ (Lindström, 2019).

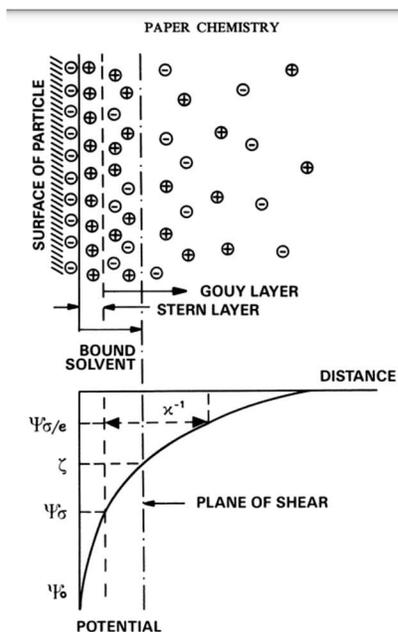


Figure 3.1 The electrostatic double layer.

Figura 4. Doble capa eléctrica en suspensión fibrosa de celulosa

Por otra parte, los procesos químicos de purificación, limpieza y oxidación de las fibras lignocelulósicas, provocan una mayor accesibilidad a los grupos activos en la superficie de la fibra, generando modificaciones que conllevan a provocar cambios en las propiedades electrocinéticas de la celulosa. Las cargas eléctricas en la superficie de las fibras celulósicas juegan un rol dominante en la interacción fibrosa durante el proceso de formación de papel y es muy importante ya que este parámetro refleja los fenómenos de interacción fibra-fibra, fibra-finos y fibra-aditivos (Stana & Ribitsch, 2008).

Uno de los procesos más importantes y que juega un rol fundamental en el proceso de elaboración de papel tissue es el proceso de refinación, el cual busca acceder a la mayor cantidad de grupos activos iónicos en la fibra para obtener una mejor formación del papel, habilitando una mayor cantidad de zonas para interacción de fibras.

En el proceso de refinación las fibras se encuentran bajo fuerzas de compresión y cizallamiento, dando como resultado cambios en la estructura de la fibra, como

fibrilación interna y externa, hinchazón, acortamiento de la fibra y formación de finos ya que este proceso involucra la deslaminación de la pared primaria y la primera capa de la pared secundaria de la fibra (Li, et al., 2019).

En fibras secundarias, es muy importante evitar la sobrefinación debido a que puede fraccionar la fibra convirtiéndola en finos con un tamaño menor a 2 micras que no servirá para formar papel ya que pasará fácilmente por los orificios de la malla formadora junto con el agua drenada, convirtiéndose así en basura aniónica, la misma que permanecerá generando un loop de proceso constante lo cual dificultará el proceso de formación y la aplicación de química del extremo húmedo de la máquina.

De acuerdo a lo mencionado existen dos parámetros medibles que son fundamentales al momento de definir la utilidad de una fibra para la elaboración de papel, estos parámetros se enfocan principalmente en la electrocinética del proceso, ya que como hemos mencionado, la formación del papel se realiza netamente por fuerzas de interacción ligadas al carácter iónico de las fibras.

2.3.1. Origen de la carga en la pasta papelera

Las fibras generalmente tienen carga negativa, principalmente debido a la presencia de grupos carboxilo (-COOH) en la superficie. Debido a la carga superficial negativa, los iones positivos como Na^+ y Al^{3+} se concentran alrededor de las fibras, formando la "supuesta" corriente de contraiones. Por cada carga negativa en la superficie de la fibra, el ion positivo se une electrostáticamente. En el caso de las pastas mecánicas, otro factor son los diferentes aditivos que se agregan durante el blanqueo de la lignina.

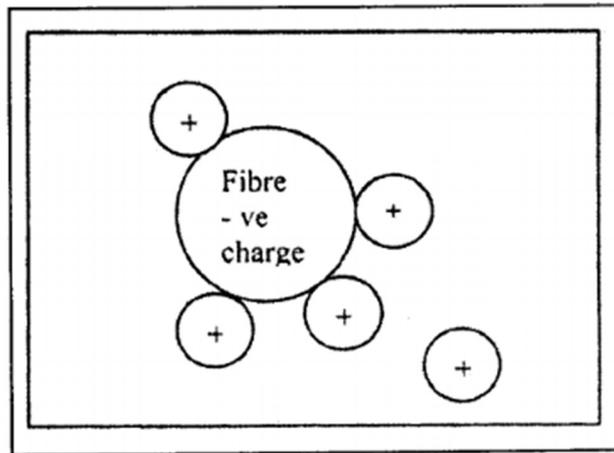


Figura 5. Cargas presentes en la suspensión fibrosa

2.3.2. Formación de grupos de ácido carboxílico.

Estos ácidos carboxílicos se forman durante el procesamiento de las materias primas de celulosa tanto en el desfibrado de pulpa como en el blanqueo. Dependiendo del proceso de pulpeado, si se trata de un proceso de desfibrado al sulfito, también se forman grupos de ácido sulfónico, que también contribuyen a la carga negativa. En el proceso de blanqueo se crean los grupos carboxílicos (-COOH) tanto en la celulosa como en la hemicelulosa. El hipoblanqueo contribuye significativamente a esto. Intentar alcanzar niveles de brillo más altos mediante el blanqueo con hipoclorito da como resultado una mayor creación de grupos de ácido carboxílico en la celulosa, así como en la hemicelulosa (carbohidratos no celulósicos). En el caso de pulpas mecánicas de alto rendimiento y ricas en lignina, los grupos cromóforos cuando son oxidados por agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno durante el blanqueo forman grupos carboxílicos que inducen carga negativa. En las pulpas blanqueadas con agentes blanqueadores específicos de lignina como el dióxido de cloro, la formación de grupos de ácido carboxílico se reduce considerablemente.

2.4. Potencial Zeta ζ

Como hemos mencionado, en una suspensión fibrosa podemos encontrar partículas sólidas que presentan un comportamiento electrocinético, en la zona central de estas partículas las cargas positivas y negativas se compensan debido a la electroneutralidad de los compuestos estables, sin embargo, al alejarnos más del núcleo de estas partículas, y al llegar a la superficie, este comportamiento se rompe ya que existe varias cargas que permanecen sin compensación, como resultado encontramos una carga predominante en la superficie de la partícula. El signo y el valor de esta carga gobierna el comportamiento de la suspensión, definiendo la magnitud de adsorción de especies iónicas que serán añadidas a lo largo del proceso y de similar manera, determina la capacidad de dispersión de partículas (Serrano, et al., 2023).

Respecto a lo expuesto, se puede definir que las partículas de un medio se atraen o rechazan entre sí, el potencial zeta busca calcular y definir una magnitud de este comportamiento, mediante el análisis de la carga superficial de las partículas de una suspensión o un sistema coloidal. Así mismo, nos indica el potencial requerido para penetrar la capa iónica que rodea el coloide y desestabilizarlo. Dicho de otra forma, el potencial zeta es una propiedad interfacial expresada en milivoltios (mV). Se debe tomar en cuenta que los procesos de ionización de grupos químicos superficiales, o la adsorción de iones suspendidos, con carga opuesta, aumenta o disminuye la carga superficial (Barbosa, et al., 2019)

2.4.1. Determinación de potencial zeta

Anteriormente se mencionó que las suspensiones fibrosas generan una doble capa eléctrica, es así que se considera como una solución iónica. Teniendo en cuenta la densidad de carga alrededor de la partícula, se distinguen dos capas, en primer lugar, la capa de Stern, inmóvil con respecto a la superficie de la partícula y de carga opuesta, y en segundo lugar la capa difusa móvil, compuesta de iones asociados libremente, es aquí donde se forma la doble capa mencionada (Figura 6). La diferencia de potencial entre el

límite exterior de la capa de Stern y la capa difusa se conoce como potencial de Stern. El potencial zeta, corresponde al potencial electrocinético generado en el plano de deslizamiento entre la capa de Stern y la capa difusa y puede determinarse indirectamente mediante una variedad de métodos (Serrano, et al., 2023).

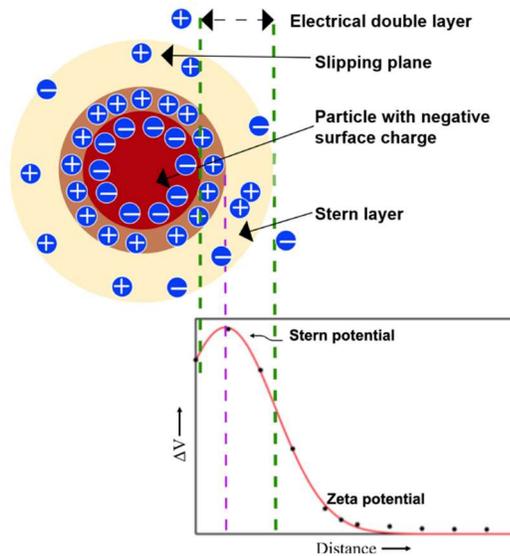


Figura 6. Capas eléctricas en la fibra de celulosa

El método más común y, por lo tanto, más utilizado para la determinación de potencial zeta es la electroforesis, que busca analizar la velocidad y dirección de desplazamiento de las partículas suspendidas en un medio iónico acuoso cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos sumergidos en la suspensión (Prasanna & Mitra, 2020).

Hasta finales de los años 80, el análisis electroforético, específicamente su movilidad, se medía principalmente mediante observación microscópica (Figura 7), en este caso se denominaba microelectroforesis, sin embargo, este método presentaba ciertas limitantes ligadas sobre todo al tiempo de ensayo y a su complejidad, por ello en la actualidad el método más utilizado es la dispersión electroforética automatizada de luz (Serrano, et al., 2023).

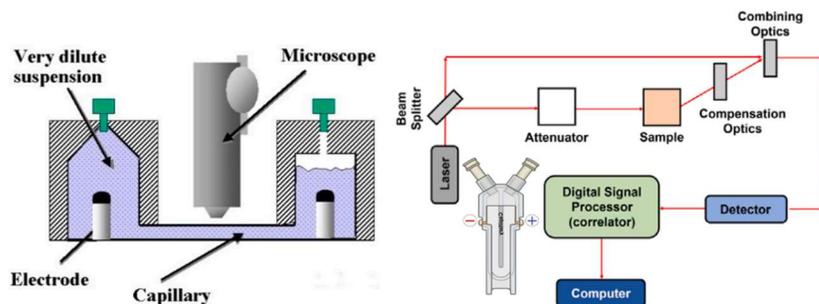


Figura 7. Esquema de un equipo de análisis de potencial zeta por migración electroforética

En los dos casos el cálculo del potencial zeta se realiza de forma indirecta y está relacionado con la movilidad electroforética, para lo cual se divide la velocidad de la partícula para la intensidad del campo eléctrico U/E , haciendo uso de la ecuación de Henry de un campo eléctrico.

$$\frac{U}{E} = \frac{2\epsilon\zeta F(ka)}{3\eta}$$

Donde U/E es la movilidad electroforética expresada en $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$, ζ es el potencial zeta que puede ser expresado en V o mV, ϵ es la permitividad dieléctrica del disolvente ($\text{kg m V}^{-2} \text{s}^{-2}$), η es la viscosidad ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) y $F(ka)$ es la función de Henry, adimensional, con valores entre 1 y 1,5 dependiendo del tipo de aproximación que se use, la cual depende del tamaño de partícula (Lunardi, et al., 2021).

Por otra parte, existe equipos más complejos que realizan un proceso de electroforesis más rápido, eliminando el ruido de la concentración de las partículas a analizarse, estos equipos consisten en una cámara con un sistema de filtración por vacío donde se ubica los electrodos que generarán el potencial eléctrico para el desarrollo del movimiento electroforético el cual es calculado de forma automática lo que expresa directamente el valor de potencial zeta.



Figura 8. Equipo actual para medición de potencial zeta

2.4.2. Potencial zeta en el proceso de elaboración de papel

El potencial zeta es una de las fuerzas que tienden a mantener las fibras en una suspensión estable. La reducción de la variación en la electrocinética de la composición mejora la estabilidad y, a su vez, mejora la capacidad de funcionamiento de la máquina. Dado que el potencial zeta se refiere a una situación más dinámica, ha encontrado más aplicación en las mediciones de carga como parte de la química del extremo húmedo. Este es el que está involucrado en varias propiedades eléctricas no estáticas de la interfaz de sólidos a líquidos y es el responsable de los efectos eléctricos observados en los coloides.

El análisis del potencial zeta es una técnica bien establecida para la caracterización de la carga superficial de partículas desde el punto de vista de la teoría clásica de la estabilidad coloidal y tiene más de tres décadas de aplicación en la industria papelera. El potencial zeta representa la densidad de carga electrostática inducida cerca de la superficie de una partícula por la acción de iones y polímeros en suspensión. La magnitud y el signo de la carga se derivan de la medición del movimiento de partículas aplicado en un campo electromagnético. Dado que estos movimientos pueden ser fuertes o débiles y depende

de la composición de la superficie de las partículas, pueden producirse distribuciones de potencial zeta (ya que no todas las partículas comparten la misma carga). Esto ocurre cuando más de un tipo de material está presente en la solución (carga mineral y finos) y cuando tiene un alto corte mecánico después de la mezcla. Por tanto, tanto la media del potencial zeta como la forma de la distribución son importantes.

El desarrollo de la carga electrostática de la pasta de celulosa, ocurre cuando las fibras se dispersan en agua. En los sistemas de fabricación de papel, esta carga puede provenir de grupos carboxílicos disociados, grupos de ácido sulfónico y adsorción de sustancias como hemicelulosas, lignina disuelta, agentes de retención y almidones catiónicos en la superficie de la partícula (generalmente la fibra). Los rellenos minerales, como el caolín y el dióxido de titanio, también desarrollan carga superficial en toda la interfaz de ionización partícula/agua y para la adsorción de otras sustancias cargadas.

Las partículas presentes en la fabricación de papel suelen ser de naturaleza aniónica. Como se observa en la Figura 9, podemos definir que la representación de la doble capa ocurre sobre la superficie de partículas hidrófobas suspendidas en agua, siendo el potencial zeta (ζ) medido entre el plano de corte y la capa de iones de carga opuesta (positiva) fuertemente adsorbidos sobre la partícula negativa (fuerzas electrostáticas e interacciones de van der Waals; las fuerzas electrostáticas son el resultado del hecho de que las superficies de las partículas están cargadas, mientras que las de van der Waals dependen de la naturaleza química de la fase sólida). En el proceso de formación de la hoja se utilizan aditivos químicos que generalmente presentan una carga positiva, por lo que el potencial zeta contribuye a definir el comportamiento de interacción de estos productos químicos con la fibra.

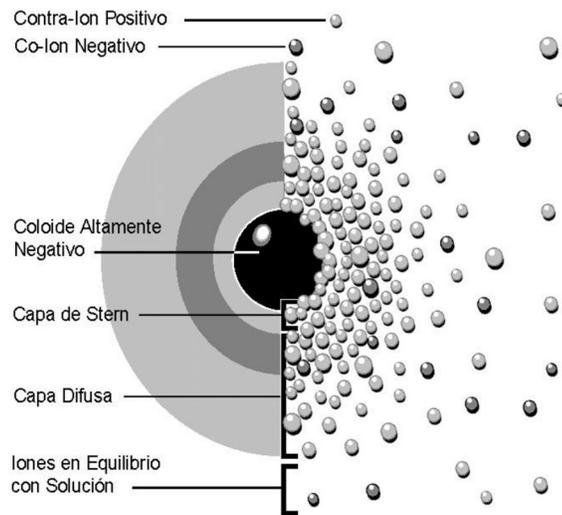


Figura 9. Ambiente electrocinética en una partícula coloidal

El valor de esta variable electrocinética en las fibras de celulosa puede verse afectado por el pH, la conductividad, la temperatura y la fuerza iónica del medio. El potencial zeta indica la capacidad de adsorción de la fibra y si el aditivo fue adsorbido. Por tanto, se puede predecir la estabilidad de las suspensiones coloidales.

2.5. Demanda de carga iónica

Anteriormente mencionamos el enfoque del potencial zeta en suspensiones de fibras, recordemos que esta variable determina la carga electrostática presente en la superficie de las fibras de celulosa, sin embargo, en el proceso papelerero, es necesario determinar la carga del sistema coloidal presente en la pasta de celulosa, esta carga puede ser de carácter aniónico o catiónico y de ello dependerá el comportamiento y variables del papel formado, ya que esta medida se encuentra íntimamente ligada a procesos de retención de rellenos durante la etapa de formación de papel (Wihakarat, et al., 2018).

La identificación de la distribución de carga en las partículas coloidales acuosas se realiza mediante técnicas electrocinéticas, sobresaliendo entre estos el potencial de transmisión. Existen varios dispositivos detectores de cargas de partículas o también

denominados PCD que utilizan la técnica del potencial de transmisión, combinado con una titulación de polielectrolitos, para medir y determinar las características electrocinéticas y el punto neutro de carga de la pulpa (Almonti, et al., 2021).

2.5.1. Importancia de medición de demanda de carga iónica en el proceso paplero

La importancia de la medición de demanda de carga iónica de las suspensiones coloidales del proceso de fabricación de papel radica en que en este proceso las partículas que varían en tamaño desde 2-3 mm en el caso de fibras de madera blanda, 0,8 - 1,2 mm en el caso de fibras de madera dura/residuos agrícolas, unas pocas micras para partículas de relleno, hasta partículas coloidales e incluso sustancias disueltas. Siendo así, uno de los principales desafíos de la fabricación de papel es convertir ese conjunto de partículas dispares en una hoja coherente que se pueda imprimir, doblar, pegar, recubrir o usar de otra manera, por ello, es indispensable conocer el comportamiento de todo el conjunto de la suspensión fibrosa con el objetivo de determinar las características que presentará el papel formado así como los aditivos químicos que se deberán utilizar para la retención, de los componentes más pequeños que se encuentran en la suspensión (Moses, et al., 2004).

Los aditivos químicos, utilizados para fijar al papel las partículas más pequeñas que se encuentran en la composición de la pasta de celulosa, trabajan mediante procesos de interacción de cargas generando procesos de floculación. La mayoría de las fibras de pulpa y también la mayoría de los rellenos tienen una carga aniónica neta, durante el proceso de formación de la hoja estas partículas tienden a dispersarse, el valor de demanda de carga brinda una idea de este grado de dispersión y define la cantidad de aditivo químico a utilizarse sin llegar al punto de neutralizar cargas o cationizar el sistema.

Muchos de los fabricantes de papel indican que se debe considerar algún tipo de medición de carga para controlar el extremo húmedo. Se han llevado a cabo muchas investigaciones para encontrar una correlación entre la carga del extremo húmedo y la

retención en la malla. Se ha informado que la magnitud y la cantidad total de carga tienen un efecto significativo en la eficacia de los aditivos químicos y en los parámetros físicos de formación de láminas, como la retención, el drenaje y la respuesta al vacío. Sin embargo, también se ha observado que ningún método de medición de una sola carga puede predecir de manera confiable la retención en todos los sistemas de pulpa, por ello, en conjunto con la carga presente en el sistema coloidal, se busca complementar con información de la medición de carga en la superficie de la fibra, ya que la formación del papel se realizará mediante la interacción de estos dos elementos (Moses, et al., 2004).

2.5.2. Control de carga aniónica

La demanda iónica del proceso de formación de papel, normalmente denominada catiónica ya que las fibras papeleras son aniónicas, indica la capacidad del sistema para absorber materiales que tengan una carga opuesta a la que se está midiendo. Esto es importante porque los efectos perjudiciales de las sustancias aniónicas solubles en agua, presentes en el sistema, interfieren con el desempeño de la mayoría de los aditivos químicos. Estas sustancias se conocen como basura aniónica, que inhiben la acción de los aditivos químicos de retención. Se ha informado que existe una correlación entre carga y retención debido a que los auxiliares de retención se consumen de manera ineficaz cuando no existe un sistema establecido para nivelar las cargas aniónicas de las sustancias coloidales disueltas (Tarrés, et al., 2018).

Tomando en cuenta que la demanda de carga está dictada por la capacidad del sistema de fabricación de papel para absorber especies químicas cargadas, es importante mantener un control adecuado de estas partículas cargadas aniónicamente, en este caso las mediciones de demanda de carga con valores muy negativos, superando los -300 ueq/L, describen una cantidad elevada de basura aniónica, por lo que se vuelve indispensable el uso de controladores o barredores de carga, para evitar que los agentes de retención sean atraídos por estas partículas y se fijen a la fibra.

2.5.3. Principios de determinación de demanda de carga

En la actualidad, para la medición de la demanda de carga se utilizan equipos detectores de cargas de partículas o PCD por sus siglas en inglés, esta medición generalmente implica el uso de una muestra del agua de proceso, después de un proceso de filtración, con el objetivo de evitar la interacción, del equipo de medición, con partículas fibrosas de mayor tamaño ya que se realiza un proceso de titulación con el polímero apropiado (catiónico o aniónico), hasta alcanzar la neutralidad eléctrica. El valor final de demanda de carga iónica lo calcula directamente el PCD, expresando como valor de polímero por unidad de fluido.



Figura 10. Equipo para medición de demanda de carga iónica

La medición de demanda de carga está basada en que las cargas superficiales de los coloides y los sólidos suspendidos en el agua provocan una concentración de iones con cargas opuestas, los llamados contraiones, en la superficie de las partículas. Si estos contraiones se separan o se cortan de esta partícula, se puede medir el potencial de flujo en mV. Un potencial de flujo de cero mV denota el punto de carga cero donde se neutralizan todas las cargas existentes en una muestra.

Las mediciones de potencial de flujo con un equipo PCD se basan en el siguiente principio: se coloca un volumen preciso de una muestra acuosa en la celda de medición. El material de muestra dispersado se adsorberá en la pared de la celda (1) así como en el pistón. Los contraiones (2) permanecen comparativamente libres. Entre la pared de la celda y el pistón (3) está previsto un espacio estrecho definido. Impulsado por un motor, el pistón oscila en la celda de medición y genera un intenso flujo de líquido. Esto arrastra los contraiones libres y los separa del material de muestra adsorbido.

En los electrodos integrados (4), los contraiones inducen una corriente que se rectifica y amplifica electrónicamente. En la pantalla se muestra un potencial de transmisión con el signo correspondiente.

Para cuantificar las cargas se añade un polielectrolito de carga opuesta hasta llegar al punto cero de carga (0 mV).



Figure 1: Measuring cell of a Mutek™ PCD-05

Figura 11. Esquema de medición de demanda de carga iónica en una celda Mutek

2.6. Recuperación de fibras celulósicas

Como parte de la preocupación medioambiental ligada a la industria de pulpa, papel y cartón, las empresas de este sector manufacturero se han encontrado constantemente buscando alternativas que les permiten desarrollar un proceso más sostenible,

manteniendo la rentabilidad industrial. En este ámbito se han generado varios estudios ligados a procesos de sostenibilidad, enfocados en los siguientes puntos, tratamiento y reutilización de aguas de proceso, recuperación de lodos y recuperación de fibra.

La alternativa de gestión más investigada ha sido la reutilización o reciclaje de lodos de proceso y recirculación de agua blanca con cierto contenido de fibra. En esta área se han generado varios métodos para recuperar fibra y rellenos de corrientes de efluentes y lodos primarios. Los sistemas de recuperación pueden ser convencionales incluyendo el uso de cribas y limpiadores o también puede incluir métodos más complejos como la oxidación con aire húmedo haciendo posible la reutilización de componentes particulares del lodo o la fibra (Ochoa, 2008).

La selección de la alternativa de recuperación más adecuada dependerá del uso al que se le va a dar a la fibra y a partir de ahí el diseño del sistema de recuperación deberá tomar en cuenta la calidad de la fibra y las características que está presente.

En un estudio realizado en Europa, se logró reutilizar lodos primarios generados como parte del proceso de fabricación de papel en 20 plantas de producción. A estos lodos se realizaron varios análisis de laboratorio con la finalidad de evaluar su comportamiento y reutilización en el proceso productivo. Los principales análisis que se realizaron fueron, porcentaje de humedad, contenido de cenizas, drenabilidad, pH y longitud promedio de la fibra. Posteriormente se realizó un proceso de formación de hojas a escala de laboratorio para evaluar el comportamiento de formación del papel. Mediante estos análisis se pudo determinar que las corrientes de desperdicio generadas como parte del proceso de elaboración de papel se pueden recuperar sin perder características de calidad del papel (Ochoa, 2008).

Por otra parte, se ha empleado tecnologías de granulación para producir agregados livianos con gravedades específicas menores a 1,0 a partir de los lodos de celulosa y agregados ligeros con gravedad específica menor a 1,5 a partir de las cenizas de

cogeneración. La reutilización de estas cenizas se ha producido en la industria cerámica, mientras que los agregados livianos han sido reinsertados al proceso de producción de papel, hacia el área de pulping (Liaw, et al., 1998).

Otro de los métodos usados para recuperación de fibra celulósica se ha enfocado en procesos de deshidratación, mediante la aplicación de fuerza mecánica a través del uso de tornillos sin fin, es así que, un estudio publicado en la revista de “Ingeniería y Ciencia de polímeros” usa esta tecnología para la inserción de fibra recuperada en el proceso de fabricación de composites de cemento demostrando que el reciclaje de esta fibra para utilización en este tipo de componentes de construcción genera un alto valor agregado al producto final (Yadollahi, 2013).

De igual manera, existen estudios que se han enfocado en la caracterización de los residuos generados en el proceso papelerero, con la finalidad de evaluar la correcta disposición de los mismos y en el mejor de los casos la reutilización. De este modo se ha observado que en este tipo de residuos existe una predominancia de óxidos de calcio CaO asociados con los productos químicos usados como rellenos en la fabricación de papel, principalmente para procesos de teñido. Los materiales que contienen CaO favorecen la resistencia mecánica de compuestos de cemento. En estas caracterizaciones se ha encontrado también bajo contenido de SiO₂ y Al₂O₃ y alto contenido de C, ligado a la celulosa presente en estos residuos. Mediante estos análisis y en base a su clasificación como elementos no nocivos se ha identificado varios usos industriales de este material (Azevedo, 2019).

Tomando en cuenta que las plantas de tratamiento de aguas integradas al proceso de elaboración de papel generan cantidades significativas de residuos celulósicos, los cuáles presentan un elevado costo de disposición final ya que el vertido no es una opción, la principal solución que se plantea es su reutilización interna en el mismo proceso productivo desde el cual se produjeron. Para evaluar la adecuada reutilización de estos materiales, el Centro Técnico del papel, ubicado en Grenoble, Francia, en uno de sus

estudios ha evaluado las características fisicoquímicas de los flujos de desperdicio generados en el proceso, mediante el análisis de demanda de carga iónica en un equipo Mütek PCD 03, haciendo uso de Polietilenimina (PEI) 8,7 ueq/ml y mediante el análisis de potencial Z medido en un equipo Mütek SZP 06. Los resultados que arrojaron estos análisis mostraron que valores de potencial Z entre -7 y -9 mV presentan un buen comportamiento al momento de reintroducirlo al proceso papelerero (Huber, 2014).

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación tuvo un enfoque cualitativo-cuantitativo ya que se realizó los análisis de demanda de carga iónica y potencial zeta a la fibra que se plantea su recuperación, con la finalidad de definir en base a estándares de proceso si la fibra es útil para retornar al proceso productivo. Así también, se validó, mediante formación de hojas de laboratorio, si la fibra presenta una buena generación de papel.

De similar manera, el diseño de la investigación es de tipo experimental, debido a las pruebas, previamente mencionadas, que se aplicaron a la fibra celulósica. Se trabajó en base al método deductivo, ya que, a partir de datos generales de la fibra recuperada, se pudo concretar datos particulares y llegar a una conclusión específica que nos permita definir la utilidad de la fibra recuperada en el proceso productivo.

3.2. Población o muestra:

En el presente estudio se define como población las corrientes de desperdicio de celulosa generadas en el proceso de preparación de pasta para la elaboración de papel tissue. Se trabajó en base a la obtención de tres muestras compuestas al día, definiendo un periodo de muestreo en base al tiempo de trabajo de la planta de preparación de pasta, tomando en cuenta los diferentes SKU's producidos.

Tabla 1. Puntos de muestreo

Ítem N°	Zona de muestreo	Sitio de muestreo	Total de muestras
1	Thickening-Kneading	Filtrado tambores y tornillos espesadores	30
2	Fine Screening	Rechazo Screen	30
3	Deinking Cell	Rechazo destintado	30
4	Paper Machine	Agua blanca máquina	30
5	Paper Machine	Tanque de Máquina	30

Para la determinación de los puntos de muestreo se utilizó el diagrama de flujo del proceso de preparación de pasta y elaboración de papel, definiendo las zonas donde se genera las más grandes corrientes de desperdicio.

3.3. Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender

A partir de las corrientes de desperdicio generadas en la planta de preparación de pasta, como parte del proceso productivo de elaboración de papel tissue, se puede obtener fibra celulósica con características que permiten reintroducir el material al proceso, sin afectar la calidad del producto y la variabilidad del proceso.

Pregunta específica

¿Es posible recuperar fibra celulósica, útil para el proceso productivo de elaboración de papel tissue, a partir de las corrientes de desperdicio generadas en las etapas de limpieza y destintado de la planta de preparación de pasta?

Idea a defender

Las corrientes de desperdicio, del proceso de preparación de pasta para producción de papel tissue, cuentan con fibra útil, con características similares a las fibras secundarias, que permiten su reinyección al proceso productivo.

3.3.1. Planteamiento hipótesis

Se puede recuperar fibra celulósica, útil para el proceso productivo de elaboración de papel tissue, a partir de las corrientes de desperdicio generadas en las etapas de limpieza y destintado de la planta de preparación de pasta.

3.4. Recolección de información:

Al tratarse de una investigación de tipo experimental, la recolección de datos se fundamentará en una serie de ensayos físico-químicos realizados a nivel de laboratorio. Estos ensayos tendrán como base la normativa TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industries) y normativo ISO. La primera normativa es una de las más utilizadas a nivel mundial en la industria de elaboración de papel, generando gran confiabilidad debido a la especificidad de su área.

De igual manera se realizará recolección de información a partir de revisión bibliográfica de artículos científicos, libros, revistas que presenten una alta confiabilidad y que sean reconocidos por su gran calidad.

3.5. Equipos y Materiales

Como se ha definido, en esta investigación se verificará las variables electrocinéticas de la fibra presente en las corrientes de desperdicio del proceso de preparación de pasta, con el objetivo de validar el residuo que presentes mejores características y se adapte de mejor manera al proceso. Adicional a estas variables se ha definido realizar un análisis de consistencia y contenido de cenizas que permita obtener un panorama más amplio de

la fibra útil que puede recuperarse para de este modo proceder con el balance de masa y lograr una mejor toma de decisiones.

De igual forma, se ha considerado otro aspecto ligado a la calidad del papel a formarse, se trata de la variable blancura, para lo cual se ha realizado un proceso de formación de hojas y posteriormente la medición de la blancura. A continuación, se detalla los equipos y materiales a utilizarse para todos estos análisis.

Equipos

Tabla 2. Equipos utilizados para los análisis desarrollados durante el estudio

Equipo	Descripción	Gráfico
Mütek SZP-10	Equipo para medición de potencial Z, utilizado para identificar cargas superficiales de fibras, pigmentos y otros materiales sólidos.	
Mütek PCD-05	Detector de cargas en partículas. Este equipo mide la carga en sustancias coloidales disueltas en muestras acuosas mediante la detección del potencial de flujo y la valoración con un polielectrolito hasta el punto de	

carga cero. Puede usarse en pulpa, líquidos, químicos y efluentes.

Clasificador de fibras Bauer Mc-Nett PTA

Equipo utilizado para determinar la distribución de fibras en base a su longitud. Trabaja a modo de una torre de tamices con mallas que presentan un mesh específico donde se retiene la fibra agrupada en base a su longitud.



Estufa

Equipo usado para procesos de secado de muestras.



Mufla

Se trata de un horno destinado a procesos de fundición o calcinación de sustancias.



Bomba de vacío

Dispositivo mecánico que genera una presión menor a la atmosférica, se usa para extracción de gases o líquidos de una muestra.



Equipo formador de hojas Equipo utilizado para la producción de hojas de papel a escala de laboratorio. Este equipo tiene una columna de formación de 205 mm de diámetro y un sistema de drenaje por gravedad.



Datacolor 400 Espectrofotómetro para mediciones por reflectancia. Equipo usado para validar mediciones de blancura en coordenada L y distintas tonalidades en coordenadas a, b, c



Reactivos

Se utilizarán dos reactivos

Tabla 3. Reactivos para medición de demanda de carga iónica

Reactivo	Descripción	Gráfico
PesNa	Nombre comercial: Sal de sodio del ácido polianetolesulfónico. Se trata de un polielectrolito aniónico	

para uso como reactiva de titulación.



PolyDADMAC

Nombre comercial: Poly-Dadmac liquid.

Se trata de un polielectrolito catiónico para uso como reactivo de titulación.



Métodos

Para el desarrollo de los análisis de las propiedades fisicoquímicas, así como medición de variables se utiliza los siguientes métodos normados.

Tabla 4. Metodologías utilizadas durante el desarrollo de la investigación

Normativa	Número	Nombre	Descripción
TAPPI	T240	Consistency (concentration) of pulp suspensions	Se trata de una normativa que regula el análisis de concentración, en peso, de fibra

			celulósica en base seca en una suspensión de pasta.
TAPPI	T233	Fiber Length of Pulp Classification	Determinación de longitud de fibra en base a la clasificación por tamices.
TAPPI	T275	Screening of Pulp (Somerville-Type Equipment)	Análisis de procesos de cribado para pulpas
ISO	UNE-ISO 11475:2010	Paper and board. Determination of CIE whiteness, D65/10° (outdoor daylight)	Normativa para medición de blancura en papel.
ISO	UNE-EN ISO 5269-1:2001	Pulps - Preparation of laboratory sheets for physical testing.	Método convencional para formación de hojas en laboratorio.

Análisis fisicoquímicos

Los análisis fisicoquímicos se desarrollaron tanto en las muestras de las corrientes de rechazos de fibra, así como en muestras de pulpa obtenidas del proceso normal al final del proceso de preparación de pasta (tanque de máquina).

a. Potencial Zeta

El análisis de potencial zeta se realizó en el laboratorio de control de proceso del área de Molinos en la planta Lasso de Grupo Familia. La medición se realizó en muestras

compuestas haciendo uso del equipo Müttek SZP-10, el cual fue previamente calibrado por parte de los proveedores de este equipo. Para la medición se tomó 500 mL de muestra de cada uno de los puntos a evaluarse; siguiendo la metodología, especificada por el proveedor equipo, se realizó la respectiva lectura de esta variable y se registró la información colocando la hora y fecha que fue tomada la muestra.

b. Demanda de carga

La medición de este parámetro se realizó en el laboratorio de control de proceso del área de Molinos en planta Lasso de Grupo Familia. De similar manera al equipo de potencial zeta, el equipo de medición de demanda de carga fue calibrado con anterioridad por el respectivo proveedor. En este caso, al ser necesario medir la suspensión coloidal de la pasta de celulosa, cada una de las muestras fueron filtradas mediante el tamiz Müttek, que viene incluido en el equipo, posteriormente haciendo uso de un volumen de 10 mL de esta muestra filtrada, se procedió a realizar la titulación electrolítica para determinación de demanda de carga.

Análisis complementarios

a. Formación de hojas y medición de blancura

Con el objetivo de validar de forma complementaria la blancura del papel, como una de sus principales variables de calidad, se desarrolló a escala de laboratorio la formación de hojas con las muestras de cada uno de los puntos de rechazo definidos para esta investigación. Para este caso se utilizó un equipo manual de formación de hojas haciendo uso de normativa ISO 5269, posteriormente se desarrolló la medición de blancura en el laboratorio de control de calidad haciendo uso de un equipo Datacolor400, permitiendo obtener de esta forma los valores de blancura de la fibra presente en cada una de las muestras de rechazo del proceso.

b. Consistencia y cenizas en pasta de papel

Al hablar de consistencia se refiere a la concentración de fibra que se encuentra presente en una muestra de pasta, en proporción peso/peso. Por otra parte, las cenizas se refieren a la cantidad de material inorgánico presente en la fibra de celulosa.

Este análisis se realizó como parte de la definición de fibra útil que puede recuperarse en cada una de las corrientes de desperdicio y han servido principalmente para el desarrollo del balance de masa, definiendo de esta forma el flujo másico recuperado en base a la fibra útil disponible en cada corriente.

3.6. Procesamiento de la información y análisis estadístico:

El diseño experimental consistió en los análisis de potencial zeta y demanda de carga iónica de las cuatro corrientes de rechazo de fibra celulósica en el proceso de preparación de pasta. Adicional, se realizó la medición de estos mismos parámetros en la suspensión fibrosa del proceso de formación de papel, esta última se trata de aquella pasta de celulosa que atravesó por toda la etapa de preparación de pasta y se utiliza para formar el papel.

El procesamiento de información y su respectivo análisis estadístico se realizó mediante el software MiniTab. Se partió de un análisis estadístico de normalidad para validar la distribución de datos y proceder con un test paramétrico o no paramétrico en base a los resultados de normalidad obtenidos.

El objetivo de estas pruebas estadísticas y sus respectivas hipótesis fue comparar los grupos de datos de las corrientes de rechazos de forma individual con los datos de la suspensión fibrosa del tanque de máquina y determinar si existen diferencias

significativas en términos de las características electrocinéticas de estudio, definiendo cuál se adaptaría de mejor manera al proceso.

Adicional, mediante los análisis de consistencia y cenizas se realiza el balance de masa para determinación de fibra útil. La investigación se desarrolló de la siguiente forma:

1. Selección de puntos de muestreo: Como punto de partida se definió dos grupos principales de puntos de muestreo a comparar, en el primero de ellos se concentra las cuatro corrientes de desperdicio con presencia de fibra celulósica y por otra parte el proceso normal.

2. Recolección de Muestras: Se recolectó un total de 30 datos para cada una de las dos variables electrocinéticas, potencial zeta y demanda de carga iónica, en cada uno de los cinco puntos de muestreo.

3. Análisis Estadístico:

3.1 Análisis Descriptivo: Se desarrolló un análisis descriptivo para resumir tus datos. Incluyendo estadísticas de resumen a modo general para cada uno de los puntos de muestreo.

3.2 Pruebas de Normalidad: Se procedió con la comprobación de la normalidad de distribución de datos para cada variable en cada punto de muestreo utilizando pruebas de normalidad especificadas para el tipo de muestras y proceso.

3.3. Evaluación de medias muestrales: Con el objetivo de identificar cuál de los puntos de rechazo es más parecido al proceso normal en términos de las propiedades electrocinéticas y en base a ello enfocarse en comparar grupos específicos, se procedió a realizar pruebas t para comparar cada punto de rechazo individualmente con el proceso normal.

4. Balance de masa: Una vez definida la corriente de desperdicio que más se adapta a los estándares de proceso para variables electrocinéticas, se procedió al desarrollo del balance de masa, definiendo la cantidad de fibra útil recuperable.

5. Diseño del sistema de recuperación: Finalmente se procedió al desarrollo del diseño del sistema de recuperación haciendo uso de diferentes equipos y accesorios para el proceso de recuperación de fibra.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de variables electrocinéticas y análisis estadístico:

4.1.1. Potencial Zeta

Los datos obtenidos en las mediciones de potencial zeta para los cuatro puntos de corrientes de desperdicio y la muestra del proceso normal (tanque de máquina), se presentan en la siguiente tabla. Las unidades de medición se encuentran en milivoltios (mV)

Tabla 5. Valores de potencial zeta para las diferentes corrientes de desperdicio

N	Filtrado Espesadores	Rechazo Screen	Rechazo Destintado	Agua blanca Máquina	Tanque de Máquina
1	-15,2	-31,1	-6,9	-18,2	-18,2
2	-15,5	-27,9	-7,8	-18,2	-17,3
3	-18,3	-31,0	-7,8	-16,4	-20,9
4	-23,4	-29,6	-7,0	-16,1	-15,5
5	-19,2	-30,9	-7,2	-17,9	-18,0
6	-15,3	-29,3	-7,6	-17,1	-17,1
7	-21,2	-28,3	-6,7	-16,4	-17,5
8	-15,7	-31,1	-6,9	-16,2	-15,2
9	-18,4	-30,4	-6,7	-19,1	-18,1
10	-22,0	-30,8	-8,0	-18,3	-16,0
11	-20,5	-26,7	-6,5	-17,3	-16,3
12	-17,5	-28,8	-6,6	-19,1	-18,6
13	-21,0	-25,2	-7,3	-18,1	-15,7
14	-18,4	-29,5	-7,8	-17,7	-18,5

15	-15,0	-25,6	-7,5	-16,9	-21,7
16	-19,5	-28,0	-6,5	-18,0	-18,3
17	-18,4	-27,6	-7,2	-17,2	-18,6
18	-22,6	-30,3	-7,1	-16,7	-17,2
19	-17,3	-28,7	-7,2	-17,5	-15,2
20	-17,4	-29,9	-7,1	-18,5	-16,6
21	-16,7	-28,2	-6,8	-16,7	-17,2
22	-18,7	-26,8	-6,7	-18,2	-20,1
23	-23,0	-27,6	-7,5	-19,3	-19,7
24	-19,0	-27,0	-7,0	-17,1	-21,9
25	-20,7	-29,3	-7,6	-18,9	-19,5
26	-19,6	-30,7	-7,4	-17,2	-19,2
27	-18,0	-27,9	-7,5	-17,8	-19,1
28	-21,6	-27,5	-8,2	-17,8	-19,7
29	-17,1	-30,0	-6,9	-17,5	-17,0
30	-21,6	-28,7	-6,9	-16,4	-17,7

4.1.1.1. Prueba de normalidad

Debido a la naturaleza del proceso, tomando en cuenta todos los factores que influyen en los valores de potencial zeta y teniendo presente que es importante evaluar la normalidad de los valores extremos, es decir, las colas de distribución, se ha optado por evaluar la normalidad con la prueba de Anderson-Darling. Paralelamente se trabaja con la prueba de Shapiro-Wilk que se especifica para números de muestras menores a 50.

Hipótesis

H0: Los valores de potencial Z siguen una distribución normal.

H1: Los valores de potencial Z no siguen una distribución normal.

Tabla 6. Resultados de pruebas de normalidad de valores de potencial zeta

Sitio de muestreo	Anderson-Darling		Shapiro-Wilk		α
	Estadístico AD	Valor p	Estadístico SW	Valor p	
Filtrado	0,29	0,601	0,96	0,381	0,05
Espesadores					
Rechazo	0,34	0,473	0,95	0,237	
Screen					
Rechazo	0,35	0,446	0,96	0,377	
Destintado					
Agua blanca	0,25	0,716	0,97	0,459	
Máquina					
Tanque de	0,19	0,889	0,97	0,590	
Máquina					

Decisión

En base a las hipótesis planteadas, se decide aceptar la hipótesis nula, en todos los puntos de muestreo, ya que el valor p es mayor que el nivel de significancia ($\text{valor } p > \alpha$). De este modo, se decide plantear las pruebas de significancia estadística mediante un test paramétrico.

4.1.1.2. Prueba t

Con el objetivo de validar cuál es la corriente de desperdicio que más se adapta o es más parecida a la muestra del proceso normal (tanque de máquina), se ha decidido trabajar con una prueba t para comparar cada punto de rechazo de forma individual con los datos obtenidos en el proceso normal.

Hipótesis

H0: $\mu_1 = \mu_2$ No existe diferencias significativas en los valores de potencial Z entre los puntos de recolección de residuos y el proceso normal.

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$ Existe diferencias significativas en los valores de potencial Z entre los puntos de recolección de residuos y el proceso normal.

Prueba

Tabla 7. Resultados prueba t potencial zeta

Muestra 1	Muestra 2	t	Valor p	α
	Filtrado Espesadores	1,53	0,137	
Tanque de	Rechazo Screen	21,56	0,000	0,05
Máquina	Rechazo destintado	-33,89	0,000	
	Agua blanca máquina	-1,33	0,194	

Decisión

De acuerdo al planteamiento de la hipótesis para la prueba t, aceptamos la hipótesis nula planteada para las corrientes del filtrado de espesadores y el agua blanca de máquina ya que su valor p es mayor que el nivel de significancia, lo que determina que sus dos corrientes no tienen diferencias significativas en relación a sus medias muestrales respecto a la muestra del proceso normal (tanque de máquina).

4.1.2. Demanda de carga

Los resultados obtenidos en las mediciones de demanda de carga iónica se indican en la siguiente tabla. Estos valores presentan unidades de $\mu\text{eq/L}$.

Tabla 8. Valores de demanda de carga iónica para las diferentes corrientes de desperdicio

Muestra	Filtrado Espesadores	Rechazo Screen	Rechazo Destintado	Agua blanca Máquina	Tanque de Máquina
1	-150	-129	-629	-144	-195
2	-161	-141	-550	-117	-180
3	-175	-143	-709	-114	-162
4	-149	-134	-614	-187	-134
5	-210	-125	-659	-157	-161
6	-230	-145	-744	-186	-161
7	-162	-163	-689	-167	-166
8	-174	-168	-701	-172	-137
9	-141	-137	-733	-135	-152
10	-170	-171	-731	-154	-142
11	-137	-175	-603	-131	-146
12	-158	-159	-564	-163	-148
13	-180	-151	-770	-176	-171
14	-218	-139	-632	-162	-164
15	-167	-132	-598	-159	-180
16	-235	-143	-560	-198	-165
17	-195	-124	-751	-156	-201
18	-129	-174	-629	-114	-177
19	-158	-153	-650	-157	-133
20	-129	-171	-658	-151	-159
21	-188	-156	-645	-190	-184
22	-155	-149	-571	-123	-159
23	-168	-157	-738	-202	-188
24	-171	-185	-733	-160	-184
25	-191	-128	-676	-209	-178
26	-133	-123	-688	-196	-169
27	-219	-165	-599	-221	-177
28	-201	-124	-684	-134	-187

29	-156	-152	-690	-150	-208
30	-158	-159	-575	-185	-171

4.1.2.1. Prueba de Normalidad

Para los valores de demanda de carga iónica, se procede de similar manera que se lo realizó con las mediciones de potencial zeta

Hipótesis

H0: Los valores de demanda de carga siguen una distribución normal.

H1: Los valores de demanda de carga no siguen una distribución normal.

Tabla 9. Resultados de pruebas de normalidad de valores de demanda de carga iónica

Sitio de muestreo	Anderson-Darling		Shapiro-Wilk		α
	Estadístico AD	Valor p	Estadístico SW	Valor p	
Filtrado Espesadores	0,52	0,176	0,95	0,149	
Rechazo Screen	0,30	0,567	0,96	0,332	
Rechazo destintado	0,35	0,462	0,95	0,293	0,05
Agua blanca máquina	0,24	0,762	0,97	0,655	
Tanque de Máquina	0,17	0,926	0,98	0,874	

4.1.2.2. Prueba t

Hipótesis

H0: $\mu_1 = \mu_2$ No existe diferencias significativas en la demanda de carga iónica entre los puntos de recolección de residuos y el proceso normal.

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$ Existe diferencias significativas en la demanda de carga iónica entre los puntos de recolección de residuos y el proceso normal.

Tabla 10. Resultados prueba t demanda de carga iónica

Muestra 1	Muestra 2	t	Valor p	α
	Filtrado Espesadores	-0,67	0,505	
Tanque de	Rechazo Screen	-3,95	0,000	0,05
Máquina	Rechazo destintado	40,21	0,000	
	Agua blanca máquina	-0,89	0,377	

Decisión

En base a los resultados se acepta la hipótesis nula para la corriente del agua blanca de máquina y para el filtrado de los espesadores

4.2. Blancura

Como análisis complementario, se desarrolló la medición de una de las variables más importantes ligadas a la calidad del papel que se formará con las fibras recuperadas, es así que se procedió a formar hojas de papel a escala de laboratorio con las muestras de los rechazos recolectados, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 11. Valores de blancura para cada corriente de desperdicio

Sitio de muestreo	Blancura (°ISO)
Filtrado Espesadores	66,8
Rechazo Screen	56,66
Rechazo destintado	55,44
Agua blanca máquina	47,31
Tanque de máquina	69,13

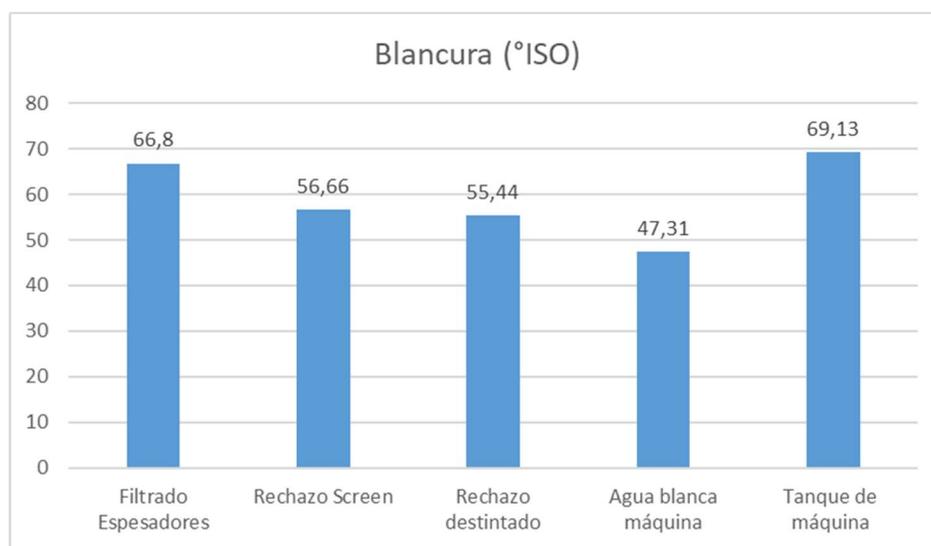


Figura 12. Blancura de papel en las diferentes muestras obtenidas de las corrientes de desperdicio

En base a los valores observados, claramente se puede definir que la hoja formada con las muestras del filtrado de espesadores (tornillos y tambores), presenta una mejor calidad en términos de blancura por lo que al reintroducirla al proceso no generaría mayor afectación.

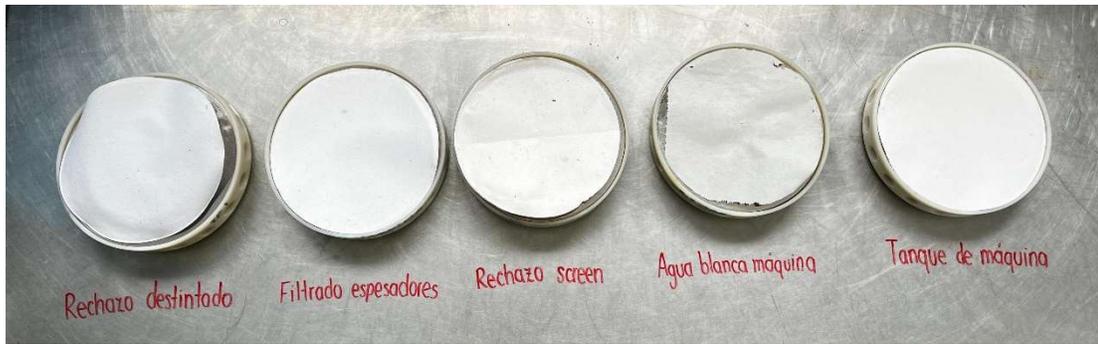


Figura 13. Hojas de laboratorio formadas con las muestras de las corrientes de desperdicio

4.3. Balance de fibra recuperada

Tomando en cuenta que existen dos corrientes de desperdicio que se adaptan de forma adecuada al proceso, es necesario identificar cuál de esos residuos generará el mejor rendimiento de recuperación mediante el balance de masa respectivo.

Para este balance se ha tomado en cuenta el flujo de trabajo, la consistencia y el contenido de cenizas presentes en cada una de las corrientes.

Tabla 12. Datos base para el desarrollo del balance de masa

Corriente de desperdicio	Flujo (m ³ /h)	Consistencia (%)	Cenizas (%)
Filtrado Espesadores	270	0,30	37,17
Agua Blanca Máquina	190	0,10	61,84

4.3.1. Determinación flujo másico

$$W = \frac{F * C}{100} * \frac{24 h}{1 día}$$

W = Flujo másico (T/día)

F = Flujo volumétrico (m³/h)

C = Consistencia. Toneladas de fibra por cada m³ de suspensión fibrosa (%)

Tabla 13. Flujo másico de las corrientes de desperdicio

Corriente de desperdicio	Flujo másico (T/día)
Filtrado Espesadores	19,44
Agua Blanca Máquina	4,56

4.3.2. Determinación fibra útil

$$F_u = \frac{W * (100 - Cz)}{100}$$

F_u = Fibra útil (T/día)

W = Flujo másico (T/día)

Cz = Porcentaje de cenizas presente en la suspensión fibrosa

Tabla 14. Cantidad de fibra útil recuperable

Corriente de desperdicio	Fibra útil (T/día)
Filtrado Espesadores	12,2
Agua Blanca Máquina	1,74

4.4. Diseño del sistema de recuperación de fibra

Una vez definida la cantidad de fibra útil, en las dos corrientes de desperdicio que presentan las mejores características electrocinéticas, se decidió proceder con el diseño del sistema de recuperación de fibra, para este caso, se hará uso de un equipo de cribado,

al que se direccionará el flujo del filtrado de los espesadores ya que es la corriente que presenta mejores características electrocinéticas y con el mejor potencial de recuperación de fibra.

4.4.1. Equipo recuperador de fibra

Para el proceso de recuperación de fibra se definió trabajar con un equipo de cribado con un tamiz curvado de tamaño de ranura de 100 μm , con una capacidad de alimentación de 200 m^3/h .

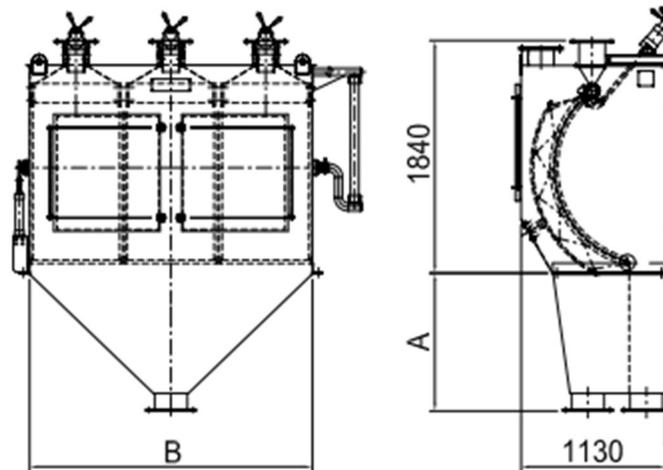


Figura 14. Equipo recuperador de fibra celulósica

Tabla 15. Características equipo recuperador de fibra

Parámetro	Valor	Unidad
Altura	600	mm
Ancho	1480	mm
Flujo alimentación	200	m^3/h
Presión de alimentación	14,5	psi
Tamaño de ranura de criba	100	μm

Tomando en cuenta el flujo volumétrico generado en la corriente de filtrado de los tambores y tornillos espesadores y en base a las características del equipo, se requiere dos recuperadores de fibra, los mismos que trabajarán en paralelo con alimentación de flujo desde un mismo tanque.

4.4.2. Diseño del sistema de bombeo al equipo recuperador de fibra

Cálculo de velocidad de flujo

Para este cálculo se cuenta con los siguientes datos:

Tabla 16. Datos base para el cálculo de velocidad de flujo hacia el equipo recuperador de fibra

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	0.055	m ³ /s
Diámetro tubería	6	pulgadas

$$v = \frac{4Q}{\pi\phi^2}$$

v : velocidad de flujo (m/s)

Q : caudal de alimentación (m³/s)

ϕ : diámetro tubería (m)

$$v = \frac{4 * 0,056 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * (0,1524 \text{ m})^2}$$

$$v = 3,04 \text{ m/s}$$

Cálculo de pérdidas por fricción en tubería

$$hf = f * \left(\frac{L}{\phi}\right) * \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

hf : pérdidas por fricción (m)

f : factor de fricción (0,01348 para acero nuevo)

L : longitud tubería (46 m) Distancia desde la bomba hacia el equipo recuperador

g : gravedad (9,81 m/s²)

$$hf = 0.01348 * \left(\frac{46 \text{ m}}{0,1524 \text{ m}}\right) * \left(\frac{(3,04 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}\right)$$

$$hf = 1,92 \text{ m}$$

Cálculo de pérdidas por accesorios

$$hac = k\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

hac : pérdidas por accesorios (m)

k : coeficiente de pérdida

En la siguiente tabla se muestran los resultados de pérdidas para cada uno de los accesorios que se implementarán en el sistema.

Tabla 17. Pérdidas por accesorios en el sistema de bombeo de la corriente de desperdicio hacia el recuperador de fibra

Accesorio	Cantidad	k	hac (m)
Ampliación	1	2,8	1,33
Válvula de mariposa	1	5,0	2,36

Codo 90°	15	12,0	5,66
T flujo lateral	1	1,8	0,85
Reducción	1	0,3	0,14
Entrada al tanque	1	0,9	0,42
Pérdida total (hac)		20,3	10,76

Pérdida por altura

Para este cálculo se toma en cuenta la diferencia de altura entre la bomba y el punto más elevado de la tubería.

$$hal = 12 \text{ m}$$

Presión requerida por el sistema

$$hp = 8 \text{ psi} * 0,704 \text{ m}$$

$$hp = 5,63 \text{ m}$$

Altura dinámica total de la bomba

$$H = hf + hac + hal + hp$$

$$H = 1,92 + 10,76 + 12 + 5,63$$

$$H = 30,31 \text{ m}$$

En base a la altura dinámica total de la bomba y tomando en cuenta las pérdidas generadas en la succión, se podrá solicitar al proveedor de equipo de bombeo, el sistema con mejores características para la implementación del diseño.

Diagrama de proceso del sistema de recuperación

Partiendo de las características del flujo de trabajo del equipo recuperador de fibra, se propone un diseño con dos de estos equipos, debido al caudal que se maneja en la corriente de filtrados de tornillos y tambores espesadores. Tomando en cuenta esta condición, se trabajará con dos sistemas de bombeo independientes con una succión desde un mismo tanque hacia donde se dirigirá los flujos de las corrientes de desperdicio. A continuación se presenta el diagrama de proceso para el sistema de recuperación.

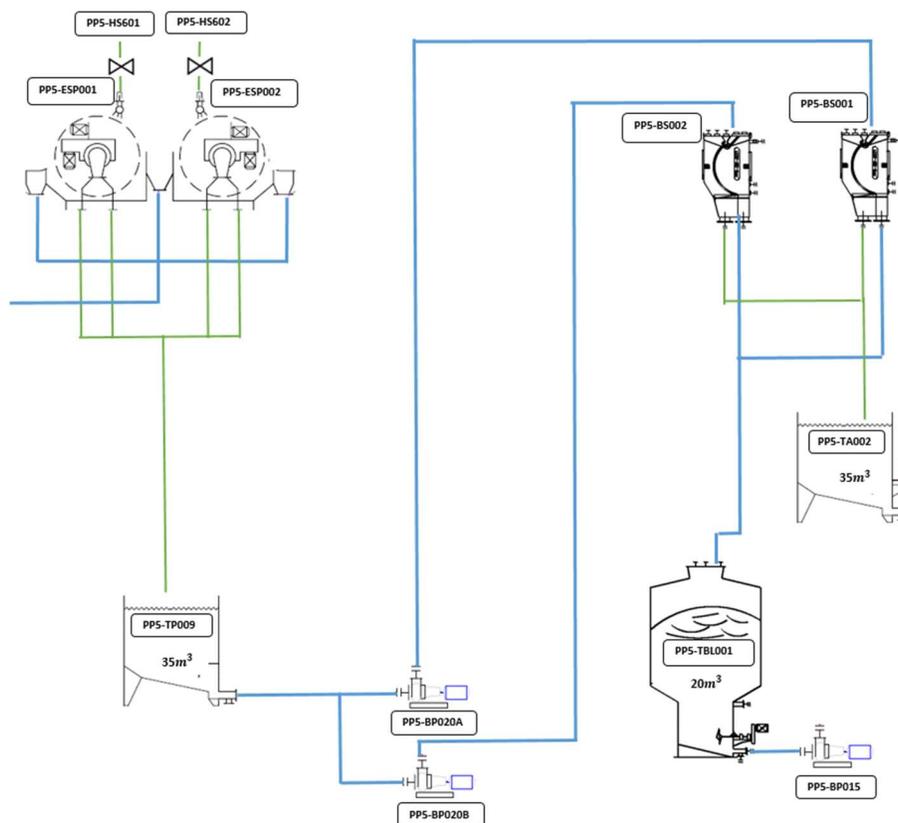


Figura 15. Diagrama de proceso del sistema de recuperación de fibra

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.

5.1. Conclusiones

La presente investigación concluye, en base a las distintas variables analizadas, que el flujo de rechazos con el mejor comportamiento para reingresarlo al proceso y recuperar fibra celulósica es el flujo de los tornillos espesadores, ya que presenta características similares a la suspensión fibrosa del proceso normal, con lo cual se evitaría presentar variación en el proceso, tanto en formación como en la aplicación de la química, manteniendo el control de las variables de operación y la calidad del papel.

Mediante los análisis de potencial zeta se define que dos de las cuatro corrientes de desperdicio presentan valores adecuados de esta variable comparados con el proceso normal. A valores de potencial zeta que superen en escala negativa los -30mV , se menciona que existe mayor estabilidad de la suspensión ya que las partículas tienden a generar una mayor dispersión debido a la carga elevada, por ello, existe mayor repulsión, evitando de esa forma eventos de floculación (Ehman, 2019). La corriente del rechazo de limpieza a baja consistencia (rechazo screen) es una de las corrientes en las que se observa un valor de potencial zeta que presenta mayor dispersión, esto debido a la naturaleza del proceso, ya que este rechazo está compuesto en su mayoría por fibras de mayor tamaño con alta presencia de lignina en su composición. Por último, el rechazo del proceso de destintado presenta un potencial zeta que tiende a generar floculación de la fibra, de igual manera ligado a la naturaleza del proceso en esa etapa, ya que se trata de un proceso de flotación por adsorción de tintas y pulpa residual, adicional este rechazo presenta un alto contenido de cenizas.

Respecto a los valores de demanda de carga iónica se observa que se repite el comportamiento observado en valores de potencial zeta, las corrientes de filtrado de

espesadores y agua blanca de máquina presenta mayor semejanza a las muestras recolectadas en el tanque de máquina, esta similitud contribuye a la estabilidad en el extremo húmedo de la máquina, zona en donde se genera todas las interacciones electrocinéticas del proceso tanto en fibras, rellenos, finos y química. El reintroducir esta fibra al proceso representaría que estas interacciones no se vean afectadas evitando generación de precipitados contaminantes o variaciones en las dosificaciones de aditivos químicos. El comportamiento de las corrientes del rechazo de screen y destintado se observa desde polos opuestos, para el caso de destintado, los valores extremadamente negativos representan una alta proporción de finos y material coloidal que requiere un exceso de aditivo catiónico para su estabilización; el rechazo del screen, por otra parte, presenta valores más cercanos al punto de neutralización, por lo que se debe variar la química del extremo húmedo de la máquina lo que puede generar variaciones considerables en la electrocinética del proceso.

Por último, apoyándonos en el balance de masa, enfocado en la concentración de fibra y en el flujo de cada una de las corrientes de desperdicio, se concluye de mejor manera cuál es la corriente que generará un mejor rédito de recuperación de fibra. Asociando este valor a las características electrocinéticas se puede tomar la decisión de definir el diseño del sistema de recuperación en base al flujo que se necesitaría tratar en el equipo recuperador de fibra.

5.2. Recomendaciones

En diseños experimentales ligados a proyectos a desarrollarse en industrias de pulpa y papel, es necesario, tomar en cuenta las características fisicoquímicas del proceso paplero con la finalidad de evaluar el comportamiento que se observará una vez arranque el proyecto para de ese modo prevenir afectaciones anticipándose a ellas y definiendo un modelo que permita combatirlas.

Necesario definir adecuadamente el modelo estadístico a usar en estos estudios en base a la cantidad y el tipo de datos que se dispone, esto permitirá mantener un mejor tratamiento y análisis de datos evitando generar errores al momento de tomar decisiones en base a las hipótesis planteadas.

En general, en el proceso papelero es indispensable incluir como parte del control de proceso las mediciones de potencial zeta y demanda de carga iónica, tomando en cuenta que se trata de mediciones complementarias una de otra.

Evaluar futuros estudios donde se pueda incluir tratamientos o aditivos químicos en las corrientes de rechazo que presentan características desfavorables para reintroducirlas en el proceso, de ese modo se puede generar un mayor beneficio en términos de reutilización de reducción de residuos, de similar manera, se puede evaluar la utilización de los lodos de proceso en actividades agrícolas con el objetivo de generar un valor agregado a este desperdicio.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1. Título

Sistema de recuperación de fibra celulósica alimentado por las corrientes de filtrados de tornillos espesadores.

6.2. Descripción

6.2.1. Flujo de filtrados tornillos espesadores

El flujo de filtrados de los tornillos espesadores, debe redireccionarse hacia un nuevo tanque de pasta con una capacidad de 35 m³. Actualmente este flujo se dirige hacia el sistema de tratamiento de aguas del proceso de preparación de pasta.

6.2.2. Sistema de bombeo

Para el sistema de bombeo, debido al caudal que se maneja (270 m³/h), se debe utilizar dos bombas de alimentación hacia el equipo recuperador de fibra, las mismas que deben trabajar en paralelo, con el objetivo de evitar saturación y taponamientos en las mallas del recuperador de fibra.

6.2.3. Equipo recuperador de fibra

Con base en las especificaciones de diseño y condiciones de trabajo para el equipo de recuperación, en este caso una pantalla cribadora de forma curva, se debe trabajar con dos sistemas en paralelo, los cuales mantendrán una presión estable de inyección de flujo para evitar variaciones de consistencia en el caudal aceptado.

6.2.4. Flujo aceptado y filtrado

Finalmente, a partir del proceso de recuperación, los dos caudales obtenidos se deben direccionar hacia cada una de las etapas del proceso que corresponde, en primer lugar, el aceptado se debe reinyectar al proceso productivo, para ello se debe enviar este flujo hacia el sistema de la torre de blanqueo para evitar variaciones de consistencia. Por otra parte, el filtrado obtenido de este proceso de recuperación se debe enviar hacia el sistema de tratamiento de aguas, en este caso con la menor carga de material sólido obtenido después del proceso de cribado en la zona de los recuperadores.

6.2.5. Diagrama de flujo

A continuación, se detalla el diagrama de flujo para el proceso de recuperación de fibra.

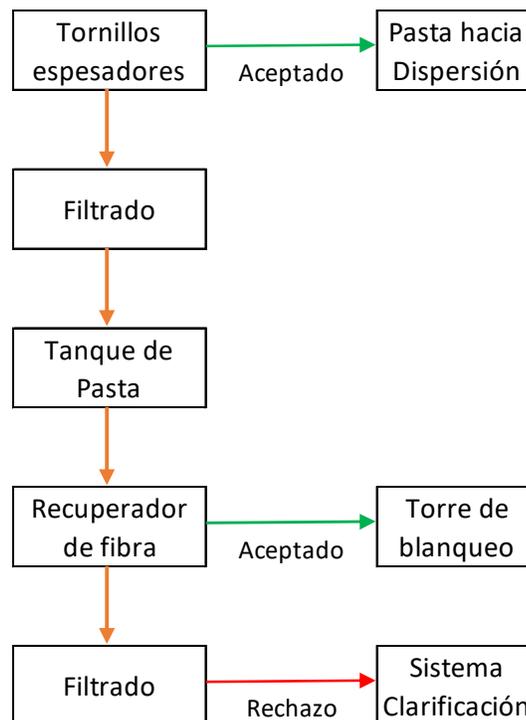


Figura 16. Diagrama de flujo para propuesta de sistema de recuperación de fibra

6.3. Desarrollo de la propuesta

6.3.1. Cronograma

Tabla 18. Cronograma de actividades para el desarrollo del sistema de recuperación de fibra

ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7
Revisión bibliográfica	X	X	X	X	X	X	
Diseño de la propuesta	X						
Balance de masa planta de preparación de pasta		X				X	
Definición de puntos de desperdicio		X					
Análisis físico-químico de corrientes de desperdicio		X	X	X			
Definición de corrientes de desperdicio a recuperarse				X			
Diseño de sistema de recuperación				X	X		
Montaje y puesta en marcha						X	X

Bibliografía

- Almonti, D., Baiocco, G., & Ucciardello, N. (2021). Pulp and paper characterization by means of artificial neural networks for effluent solid waste minimization—A case study. *Journal of Process Control*, 105, 283-291.
- Alda, J. (2008). Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(7), 965-972.
- Azagra, J. (2013). Evaluación técnica y económica de alternativas para la recuperación de fibra en la salida del proceso papelerero. [Tesis para optar por el título de Ingeniera Civil Química, Universidad de Chile]. Repositorio institucional de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115074/Evaluacio%cc%81n%20te%cc%81cnica%20y%20econo%cc%81mica%20de%20alternativas%20para%20la%20recuperacio%cc%81n%20de%20fibra%20en%20la-salida-del-proceso-papelerero.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Azevedo, A., Alexandre, J., Pessanha, L., da ST Manhães, R., de Brito, J., & Marvila, M. T. (2019). Characterizing the paper industry sludge for environmentally-safe disposal. *Waste Management*, 95, 43-52.
- Bajpai, P. (2018). Brief description of the pulp and papermaking process. *Biotechnology for pulp and paper processing*, 9-26.
- Barbosa, J. A., Abdelsadig, M. S., Conway, B. R., & Merchant, H. A. (2019). Using zeta potential to study the ionisation behaviour of polymers employed in modified-release dosage forms and estimating their pKa. *International journal of pharmaceutics*: 10, (1).

- Bhardwaj, N. K., Kumar, S., & Bajpai, P. K. (2007). Effect of zeta potential on retention and drainage of secondary fibres. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 260(1-3), 245-250.
- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential—what they are and what they are not?. *Journal of controlled release*, 235, 337-351.
- BIR. (2019). PAPER AND BOARD RECYCLING IN 2018. Bruselas: Bureau of International Recycling.
- Becerra, B. (16 de Noviembre de 2021). Suben precios del papel y del cartón debido a la crisis de suministros que hay en el mundo. *La República*.
- Cabrero, S. (15 de Noviembre de 2021). El papel también sucumbe a la crisis de desabastecimiento mundial. *La voz de Galicia*.
- Cadena, E. M., Garcia, J., Vidal, T., & Torres, A. L. (2009). Determination of zeta potential and cationic demand in ECF and TCF bleached pulp from eucalyptus and flax. Influence of measuring conditions. *Cellulose*, 16, 491-500.
- Clogston, J. D., & Patri, A. K. (2011). Zeta potential measurement. Characterization of nanoparticles intended for drug delivery, 63-70.
- Ehman, N. V. (2019). Nanocelulosa a partir de residuos agro y foresto industriales. [Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Misiones]. Repositorio institucional CONICET Argentina. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80941>

- Grupo Familia. (12 de Noviembre de 2021). Sostenibilidad. Grupo Familia. Obtenido de Grupo Familia Web site.
- Heredia, N. (2016). Diseño de un sistema recuperador de fibra celulósica a partir de corrientes residuales provenientes de una planta recicladora de papel. [Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16899/1/CD-7478.pdf>
- Hirn, U., & Schennach, R. (2015). Comprehensive analysis of individual pulp fiber bonds quantifies the mechanisms of fiber bonding in paper. *Sci Rep.* <https://doi.org/10.1038/srep10503>
- Huber, P., Ossard, S., Fabry, B., Bermond, C., Craperi, D., & Fourest, E. (2014). Conditions for cost-efficient reuse of biological sludge for paper and board manufacturing. *Journal of cleaner production*, 66, 65-74.
- Li, Z., Liu, W., Guan, F., Li, G., Song, Z., Yu, D., & Liu, H. (2019). Using cellulose fibers to fabricate transparent paper by microfibrillation. *Carbohydrate polymers*, 214, 26-33.
- Liaw, C. T., Chang, H. L., Hsu, W. C., & Huang, C. R. (1998). A novel method to reuse paper sludge and co-generation ashes from paper mill. *Journal of hazardous Materials*, 58(1-3), 93-102.
- Lindström, T. (2019). *Electrokinetics of the papermaking industry*. Indiana: Roberts, J.C. (eds) *Paper Chemistry*. Springer, Dordrecht.

- Lunardi, C. N., Gomes, A. J., Rocha, F. S., De Tommaso, J., & Patience, G. S. (2021). Experimental methods in chemical engineering: Zeta potential. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(3), 627-639.
- Mathews, J., Gustafson, R., & Hodgson, K. (2004). A method to determine the charge demand of single pulp fibers. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 453 - 459.
- Martínez, J. (2012). Estudio del comportamiento electro-reológico de suspensiones de fibras celulósicas bajo la influencia de aditivos químicos funcionales utilizados ampliamente en la industria papelera (agentes de retención y drenaje). [Tesis para optar por el título de Magister en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/10063/10951498.2012.pdf?sequence=1>
- Miao, Y., Xiang, S., Wei, Y., Long, X., Qiu, J., & Miao, Y. (2023). Physical Properties of Pulp and Paper: A Comparison of Forming Procedures. *Forest Products Journal*, 73(2), 175-185.
- Nascimento, A., & Moreira, J. (2015). Influence of Zeta Potential in Physical and Mechanical Properties of Recycled Paper. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 65-70.
- Ordaz-Díaz, L. A., Valle-Cervantes, S., Rodríguez-Rosales, J., Bailón-Salas, A. M., Madrid-Del Palacio, M., Torres-Fraga, K., & Luis, A. (2017). Zeta potential as a tool to evaluate the optimum performance of a coagulation-flocculation process for wastewater internal treatment for recirculation in the pulp and paper process. *BioResources*, 12(3), 5953-5969.

- Paul, M., Praburaj, T., Rajesh, S., & Rao, K. G. V. (2004). Charge Measurement and its Importance in Wet End Chemistry-A Review and Experience in Bagasse Paper Making. *IPPTA*, 16(1), 67-74.
- Prasanna, N. S., & Mitra, J. (2020). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from *Cucumis sativus* peels. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116706.
- Przybysz P, Dubowik M, Kucner MA, Przybysz K, & Przybysz Buzala K. (2016). Contribution of Hydrogen Bonds to Paper Strength Properties. *PLoS One*, 11(5). doi: 10.1371/journal.pone.0155809.
- Serrano-Lotina, A., Portela, R., Baeza, P., Alcolea-Rodriguez, V., Villarroel, M., & Ávila, P. (2023). Zeta potential as a tool for functional materials development. *Catalysis Today*, 423, 113-122.
- Stana-Kleinschek, K., & Ribitsch, V. (2008). Electrokinetic properties of processed cellulose fibers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 140(1-3), 127-138.
- Stenstad, P., Andresen, M., Steinar, B., & Stenius, P. (2008). Chemical Surface modifications of microfibrillated cellulose. *Springer Science+Business Media B.V.*, 35-45.
- Tarrés, Q., Area, M. C., Vallejos, M. E., Ehman, N. V., Delgado-Aguilar, M., & Mutjé, P. (2018). Key role of anionic trash catching system on the efficiency of lignocellulose nanofibers in industrial recycled slurries. *Cellulose*, 25, 357-366.

- Wihakarat, S., Khantayanuwong, S., & Somboon, P. (2018). Effect of strength additive modified starches on electrokinetic, retention and drainage of linerboard pulp suspension. Kasetart University Annual Conference, Bangkok (Thailand).
- Yadollahi, R., Hamzeh, Y., Ashori, A., Pourmousa, S., Jafari, M., & Rashedi, K. (2013). Reuse of waste sludge from papermaking process in cement composites. *Polymer Engineering & Science*, 53(1), 183-188.
- Yoval, L. S., Palacios, L. M., Soberanis, M. P., & Guzmán, L. (2013). Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer. Instituto Mexicano de tecnología del Agua. Disponible em [www. bvsde. paho. Org/bvsaidis/tratagua/mexicona](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona).

Anexos

ANEXO I. Mediciones de demanda de potencial zeta y demanda de carga iónica



ANEXO II. Certificado de calibración equipo de medición de demanda de carga iónica



BTG Americas Inc.

5085 Avalon Ridge Prkwy, Norcross GA 30071 Ph: (770) 209-6900 Fax: (770) 447-8440

Q.A. TEST REPORT

RMA #	19547
Client #	1002760
Client	Productos Familia
Address	Quinto, Ecuador
End Customer	Productos Familia
Date	20-Dec-22
Unit	PCD-05
Serial no.	83858501
Last Date Repaired	25-Nov-19
Report By	S.Coles
Country	South America

	Test 1	Test 2
Start Potential:	-1607	-1609
Potential Fluction:	(+/-3)	(+/-3)
Consumption:	-9.82	-9.83

Cell/Piston calibration - Should be approx. -1600 mV

Actual mV:	-1052
------------	-------

Cationic Pump Factor:	4.82
Anionic Pump Factor:	4.93

PCD-04 Only

Analog Output (T3 connected and set to PCD-Sensor)

-1.6 V Adjusted	<input type="checkbox"/>
0 V Adjusted	<input type="checkbox"/>
+1.6V Adjusted	<input type="checkbox"/>

Analog Input (cell/piston cleaned, 10 mL PesNa filled)

Test Started and Stopped After digits green for 10 seconds	<input checked="" type="checkbox"/>
Measure Screen mV approx. -1600 mV	<input checked="" type="checkbox"/>

pH Only

Analog Input pH (precision power supply connected)

-0.4 V Adjusted	<input type="checkbox"/>
0 V Adjusted	<input type="checkbox"/>
0.4 V Adjusted	<input type="checkbox"/>

Internal

ANEXO II. Certificado de calibración equipo de medición de potencial zeta



BTG Americas Inc.

5085 Avalon Ridge Prkwy, Norcross GA 30071 Ph: (770) 209-6900 Fax: (770) 447-8440

Q.A. TEST REPORT

RMA #	20738
Client #	1002760
Client	Productos Familia
Address	Quito, Ecuador
End Customer	Productos Familia
Date	19-Dec-22
Unit	SZP-10
Serial no.	83069601
Last Date Repaired	3/24/2017
Report By	S.Coles
Country	South America

	TEST 1	TEST 2	
ZETA:	-10.5	-10.7	Should be with 5% of each other
mS/cm:	0.189	0.193	Should be with in 0.2% of Zeta Test used
mBAR:	198	198	
mV:	-0.62	-0.633	

EL factor:	2.8	0-3.5
Cell Factor:	2.3	0-3.5

SZP-10 ONLY

Check of analog Input Pressure (3049)

-0.200 bar	0.2
-0.400 bar	0.4

Pressue Tested under Test	-200	Good	Should be within 10
	-400	Good	
	max(-600)	Good	
	Back	Good	

SZP-06 Only

Baud	
Variation of mV	
Variation of p	
Date	
Time	

Internal

ANEXO III. P&ID Sistema Recuperador de Fibra

