



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

***“OBTENCIÓN DE PAPEL RECICLADO MEDIANTE EL USO DE UNA
COLUMNA DE FLOTACIÓN Y LA CARACTERIZACION DE LAS FIBRAS
DE PAPEL OBTENIDAS.”***

T E S I S:

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERIA QUIMICA**

PRESENTA:

P.I.Q. GLORIA LINDERO EMILIANO

ASESORA:

M.C. MA. AIDA BEJAR UBALDO

ASESOR EXTERNO POR EL I.I.M.:

DR. RAMIRO ESCUDERO GARCIA

MORELIA MICHOACAN, MARZO DE 2007.



U.M.S.N.H.

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

231/2006/2007

C.
GLORIA LINDERO EMILIANO
PASANTE DE INGENIERIA QUIMICA
PRESENTE.

En contestación a su atenta solicitud de fecha 31 de octubre del 2006 permito comunicarle a usted que se aprueba el tema de tesis propuesto para presentar Examen Recepcional en la Carrera de Ingeniero Químico.

El tema aprobado: **"Obtención de papel reciclado mediante el uso de una columna de flotación y la caracterización de las fibras de papel obtenida"** el cual se desarrolla bajo el siguiente índice:

- I. Introducción.
- II. Antecedentes.
- III. Procedimiento Experimental.
- IV. Resultados y discusión de resultados.
- V. Conclusiones.
- VI. Recomendaciones.
- VII. Sugerencias para trabajos futuros.
- Glosario.
- Bibliografía.
- Apéndice.

Para tales efectos fungirá como asesor interno de su tesis la C. M.C. Ma. Aida Bejar Ubaldo Profesora de la Facultad de Ingeniería Química y su mesa de jurado para revisión y realización de este trabajo estará integrada por:

DR. AGUSTIN JAIME CASTRO MONTOYA	(PRESIDENTE)
ING. MARIO FLORES RICO	(VOCAL)
M.C. MA. AIDA BEJAR UBALDO	(VOCAL)
ING. LEONARDO TENORIO CANCINO	(SUPLENTE)

ATENTAMENTE
Morelia, Mich., 10 de enero del 2007

M. en A. DELIA MORENO JUAREZ
DIRECTORA DE LA FACULTAD

U.M.S.N.H.



FACULTAD DE INGENIERIA
QUIMICA

AGRADECIMIENTOS

A Dios que me ha permitido llegar al término de este trabajo.

A mis papas y hermanos por el apoyo que me han brindado para salir adelante todo el tiempo, por su esfuerzo para permitir que a pesar de circunstancias adversas yo pudiera culminar mis estudios.

A todos mis familiares que con su apoyo y afecto han contribuido en mi formación personal y profesional.

A mi asesora M. C. Ma Aída Béjar Ubaldo por crear en mí una conciencia positiva de superación en el ámbito personal, en el profesional y por el dedicado apoyo que me otorgo para que yo pudiera realizar la tesis.

Al Dr. Ramiro Escudero García por todo el apoyo brindado, por su enseñanzas y amables consejos.

A Eunice por su paciencia para conmigo, por compartir sus conocimientos, y por tiempo que me dedico.

A los Ingenieros Francisco Villalobos Rangel y Enrique González Avalos, por que mucho tiempo que me han apoyado de varias maneras para terminar esta tesis.

A mis amigos Oliva, Rocio, Yolanda, Alex Z, Marcela, Jennifer, Fabiola, por estar ahí siempre cuando los necesite, por brindarme compañía, alegría, animo, por escucharme y compartir conmigo innumerables horas de estudio.

A todos los que fueron mis profesores en las diferentes etapas de estudio desde la primaria hasta la licenciatura, por que siempre me motivaron a estudiar para lograr un titulo universitario y realizarme como profesionista.

A La Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo, mi casa de estudios por varios años, por que me brindo la oportunidad de adquirir el conocimiento en el área profesional de Ingeniería Química.

Y a todos aquellos que me han apoyado y que no podría nombrar por ser una larga lista.

Gloria Lindero Emiliano

INDICE

	Pág.
RESUMEN	xiii
OBJETIVOS	xv
JUSTIFICACION	xvi
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN	(1)
CAPITULO II	
ANTECEDENTES	(3)
2.1 Reciclado de papel.	(3)
2.2. Uso de las columnas de flotación en el reciclaje de papel.	(7)
2.3. Descripción de las columnas de flotación.	(7)
2.4. Definición de variables de operación.	(9)
2.4.1. Velocidad de fase.	(9)
2.4.1.1. Velocidades superficiales.	(9)
2.4.1.2. Velocidades relativas entre fases (de deslizamiento)	(11)
2.4.2. Cantidades relativas de las fases.	(12)
2.4.2.1. Flujos de alimentación, colas y concentrado.	(13)
2.4.2.2. Contenido de aire, sólido y líquido.	(13)
2.4.3. Área superficial de burbuja.	(16)
2.4.4. Tiempo de residencia de la pulpa.	(16)
2.4.5. Recuperación del material valioso.	(17)
2.5. Química de la flotación.	(17)
2.6. Mecanismos de formación agregado burbuja-partícula de tinta.	(18)
2.7. Celulosa.	(18)
2.7.1. Estructura de la celulosa.	(19)
2.7.2. Clasificación de la celulosa.	(19)
2.7.3. Propiedades de la celulosa.	(19)
2.7.3.1. Reactividad y accesibilidad.	(20)
2.7.3.2. Hinchamiento y Disolución.	(20)
2.8. Hemicelulosas y Ligninas.	(21)

2.8.1. Hemicelulosas.	(21)
2.8.2. Ligninas.	(21)
2.9. Procesos de pulpeo.	(22)
2.10. Producción de pulpa con fibras secundarias.	(23)
2.10.1. Destintado de papel.	(24)
2.11. Pruebas físicas comunes realizadas a las hojas hechas a mana para determinar la calidad del papel.	(25)
2.12. Peso molecular viscosimetrico.	(25)

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	(27)
3.1. Construcción de una columna de flotación a nivel laboratorio.	(28)
3.2. Determinación de los parámetros operativos de la columna.	(28)
3.2.1. Velocidad superficial de aire (J_g cm/seg) y fracción volumétrica de gas.	(28)
3.3. Experimentación para el destintado del papel.	(29)
3.4. Manejo de muestras en las corrientes.	(32)
3.5. Fabricación de las hojas de papel.	(33)
3.6. Caracterización de las hojas de papel obtenidas.	(36)
3.6.1. Realización de las pruebas físicas.	(36)
3.6.2. Determinación de la viscosidad.	(37)
3.6.3. Determinación del tipo de fibra, longitud y diámetro.	(40)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS	(41)
4.1. Selección de materia prima.	(41)
4.2. Desmenuzado o triturado del papel.	(41)
4.2. Desfibrado y mezclado del papel.	(41)
4.4. Determinación de los parámetros operativos de la columna.	(41)
4.4.1. Determinación de la velocidad superficial de aire (J_g optimo)	(42)
4.4.2. Determinación de la fracción de gas ϵ_g .	(43)
4.5. Balance de materia.	(44)
4.6. Recuperación del material valioso.	(49)
4.7. Resultados obtenidos para las pruebas físicas realizadas a las hojas elaboradas	

manualmente con los diferentes tipos de papel reciclado.	(49)
4.7.1. Representación grafica para las pruebas de Gramaje, Calibre, Opacidad, Blancura, Tensión y Rasgado.	(50)
4.7.2. Viscosidad.	(55)
4.7.3. Composición fibrosa de las hojas de papel.	(56)
4.7.4. Longitud y Diámetro.	(57)
4.8. Costos.	(58)
CAPITULO V	
CONCLUSIONES	(60)
CAPITULO VI	
RECOMENDACIONES	(61)
CAPITULO VII	
SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS	(62)
BIBLIOGRAFIA	
APENDICES	

GLOSARIO

Blancura: Es la reflectancia intrínseca de un sustrato, medida a una longitud de onda de luz, efectiva, de 457 nanómetros.

Calibre: Se define como el espesor de una hoja.

Celulosa: Polímero formado por unidades de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos β (1,4), en promedio tiene 7 000 unidades de glucosa, pero puede contener hasta 12 000. La fórmula química de la celulosa es $(C_6H_{10}O_5)_n$, en donde n es el grado de polimerización (conocido como DP, degree of polymerization), es decir, el número de unidades de glucosa que se unen para formar cadenas largas sin ramificaciones que integran las fibras. El peso molecular de la celulosa varía de 100 000 a 1 000 000.

Columna de flotación: Las columnas de flotación deben su nombre a su forma en su diseño, esta es vertical. La columna de flotación se usa, como una herramienta de separación de fases específicas dispersas en un medio continuo acuoso, mediante sus interacciones con la superficie de burbujas de gases, comúnmente aire, que también se dispersan en un medio acuoso.

Desfibrador: Equipo utilizado para la separación de las fibras, y preparación de la pulpa.

Efecto invernadero: Es uno de los principales factores que provocan el calentamiento global de la Tierra, debido a la acumulación de los llamados gases invernadero CO_2 , H_2O , O_3 , CH_4 y CFC's en la atmósfera.

Fibra Elemento morfológico fundamental de las plantas superiores, las fibras son un cúmulo de células de forma aproximadamente cilíndrica, de longitud y diámetro variable.

Fibra Virgen fibra que no ha sido utilizada previamente en ningún producto de papel o cartón.

Grado de polimerización: Número de unidades repetitivas que lo forman, esto es el número de unidades monoméricas que se unieron para formar una cadena.

Gramaje: Masa del papel, expresada en g/m^2 . Los valores varían desde 60 hasta 350 gramos sobre metro cuadrado (los que se utilizan en las imprentas)

Hemicelulosas: Son polisacáridos diferentes de la celulosa presentes en las paredes de la célula vegetal.

Ligninas: Son polímeros aromáticos de enlace altamente cruzado, que carece de unidades de repetición regular debido a que se forman por condensación de radicales libres.

Opacidad: La opacidad describe la manera en que el papel bloquea el paso de la luz. Los papeles altamente opacos evitan impresiones que muestren el otro lado del papel y son considerados buenos para impresiones por ambos lados en documentos como folletos, boletines y calendarios.

Papel: Es una estructura obtenida en base a fibras vegetales de celulosa, las cuales se entrecruzan formando una hoja resistente y flexible. Estas fibras provienen del árbol generalmente.

Peso molecular: Es un criterio para determinar el tamaño de la cadena molecular, ya que a mayor peso molecular corresponde un mayor tamaño, y el primero puede obtenerse multiplicando el grado de polimerización por el peso molecular de la unidad repetitiva.

Polímeros: Son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

Pulpa química: En el proceso de la pulpa química, la madera es tratada con sustancias químicas que separan las fibras de celulosa.

Pulpa mecánica: En el proceso mecánico, la madera es precalentada con vapor y después tratada mecánicamente.

Pulpa semiquímica: Este proceso implican aquellos procedimientos donde se utilizan etapas de tratamientos químicos y etapas de procesamiento mecánico.

Rasgado: Determina la fuerza promedio perpendicular al plano del papel requerida para rasgar una hoja.

Reciclaje: Es el tratamiento de materiales que pueden ser reciclados en productos nuevos. El reciclaje previene los recursos materiales útiles que son perdidos, reduce el consumo de materias primas y reduce uso de la energía, y por lo tanto las emisiones de gas del efecto invernadero.

Silvicultura: (Del latín Silva, Selva, Bosque, y Cultura, Cultivo) Es la ciencia destinada a la formación y cultivo de bosques (Forman parte de su campo el arte de crear o conservar un bosque, y la teoría y la práctica de regular el establecimiento de una masa arbórea, su composición y desarrollo). Podríamos afirmar que es una ciencia hermana de la agricultura, diferenciándose de ésta en varios aspectos, uno de los cuales es el tiempo de espera para la cosecha: en tanto la agricultura obtiene sus frutos o cosechas en meses, la silvicultura las obtiene después de muchos años.

Tensión: Propiedad que determina la fuerza requerida para romper una tira angosta de papel con una longitud y anchura cuidadosamente especificadas.

Velocidad superficial de gas: Es el gasto volumétrico de gas dividido entre el área transversal normal a la dirección de su flujo.

Viscosidad: Se define como la resistencia de un líquido a fluir, es decir, la fuerza que se oponga a la deformación y movimiento de un líquido dentro de su propia masa.

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Papeles reciclables y no reciclables.	(4)
Tabla 2.2. Contenido de celulosa en diferentes vegetales.	(20)
Tabla 2.3. Parámetros para la ecuación de Mark-Houwink-Sakura	(26)
Tabla 4.1. Cantidades utilizadas para obtener una pulpa con consistencia de 0.8% en peso.	(41)
Tabla 4.2. Resultados obtenidos de Db con respecto Jg.	(42)
Tabla 4.3. Valores de diferencia de presión tomados de dos puntos, de velocidad superficial de aire y fracción de gas.	(43)
Tabla 4.4. Resultados de los flujos obtenidos en la columna de flotación para los diferentes topos de papel.	(44)
Tabla 4.5. Resultados de los flujos de las corrientes de la columna en (cm ³ /seg.)	(45)
Tabla 4.6. Resultados del balance de materia total en la columna.	(45)
Tabla 4.7. Resultados de flujos obtenidos para la fibra y el agua para M1.	(46)
Tabla 4.8. Resultados de los flujos obtenidos para la fibra y el agua en las corrientes de la columna de flotación para M2,	(46)
Tabla 4.9. Resultados de los flujos obtenidos para la fibra y el agua en las corrientes de la columna de flotación para M3.	(47)
Tabla 4.10. Flujos obtenidos para la fibra y el agua en las diferentes corrientes de la columna de flotación para M4.	(48)
Tabla 4.11. Resultados obtenidos en el balance por componente para las 4 muestras.	(48)
Tabla 4.12. % de recuperación del material valioso.	(49)
Tabla 4.13. Resultados obtenidos de las prueba a las hojas elaboradas manualmente.	(50)
Tabla 4.14. Valores de viscosidades obtenidas para las diferentes muestras.	(55)
Tabla 4.15. Tabla de pesos moleculares calculados a partir de la ecuación de Mark-Houwink-Sakura.	(56)
Tabla 4.16. Longitudes y diámetros para las diferentes fibras.	(57)

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Columna de flotación.	(8)
Figura 2.2. Medición de la fracción de gas por diferencia de presión.	(14)
Figura 2.3. Mecanismo agregado burbuja-partícula de tinta.	(18)
Figura 2.4. Estructura de la celulosa.	(19)
Figura 2.5. Efectos de los procesos de pulpeo sobre las fibras.	(23)
Figura 3.1. Diagrama de flujo de proceso.	(27)
Figura 3.2. Columna de flotación y tanque desfibrador.	(29)
Figura 3.3. Selección y clasificación de papeles	(30)
Figura 3.4. Papel desmenuzado.	(30)
Figura 3.5. Papel desfibrado.	(31)
Figura 3.6. Destintado en la columna.	(32)
Figura 3.7. Filtrado en malla.	(32)
Figura 3.8. Desfibrador para hacer hojas de prueba.	(34)
Figura 3.9. Equipo formador de hojas.	(34)
Figura 3.10. Prensa de hojas.	(35)
Figura 3.11. Mufla secadora de hojas.	(35)
Figura 4.1. Comportamiento del diámetro de burbuja con respecto la velocidad superficial del aire..	(42)
Figura 4.2. Grafica de valores de velocidad superficial de aire J_g con respecto a la velocidad superficial de gas ϵ_g .	(44)
Figura 4.3. Grafica de los valores de gramaje para las hojas de papel obtenidas.	(51)
Figura 4.4. Grafica de la comparación de calibre para las diferentes tipos de papel.	(51)
Figura 4.5. Grafica de la opacidad respecto a los diferentes tipos de papel.	(52)
Figura 4.6. Grafica de la blancura respecto a las diferentes tipos de papel.	(53)
Figura 4.7. Grafica de la tensión respecto a las diferentes tipos de papel.	(54)
Figura 4.8. Grafica del rasgado respecto a las diferentes tipos de papel.	(54)
Figura 4.9. Porcentaje de fibras de diferentes especies de madera que componen las hojas de los distintos tipos de papel elaborado.	(57)
Figura 4.10. Precio histórico de la celulosa.	(59)

TITULO

“OBTENCIÓN DE PAPEL RECICLADO MEDIANTE EL USO DE UNA COLUMNA DE FLOTACIÓN Y LA CARACTERIZACION DE LAS FIBRAS DE PAPEL OBTENIDAS.”

RESUMEN

En este trabajo se llevo a cabo un estudio para obtener papel reciclado mediante el uso de una columna de flotación para el destintado del papel usado y se realizo la posterior caracterización de las fibras del papel obtenido.

Se utilizo como materia prima muestras de papel periódico, papel de oficina y una mezcla de 50% de papel de oficina y papel periódico, se utilizo un tanque desfibrador y acondicionador de pulpa, se diseño y uso una columna de flotación, en la cual se realizo el proceso de separación de las tintas, o pigmentos de la pulpa de papel, y para la elaboración de las hojas para pruebas se utilizo un desfibrador para la separación de las fibras de celulosa, un equipo formador de hojas, una prensa, una mufla donde se secaron las hojas elaboradas con pulpa de papel reciclado

Se determinaron las variables de operación de la columna óptimas en fase aire-agua para el proceso.

Para llevar a cabo el destintado se acondiciono la pulpa utilizando Aceite de Pino como espumante y NaOH como desfibrador de pulpa y agente colector.

Después de haberse obtenido la fibra se procedió a hacer los análisis físicos tales como: gramaje, calibre, opacidad, blancura, tensión y rasgado, Mismos que se realizaron en la Industria Crisoba S.A. de C.V., mediante los equipo de la empresa. Se determino la viscosidad en pulpa para obtener el peso molecular de la celulosa utilizando un viscosímetro capilar.

También se realizaron análisis morfológicos de la fibra (diámetro y longitud) mediante Microscopia Electrónica de Barrido y una cámara de conteo. El Microscopio Electrónico de Barrido, la cámara de conteo, fueron facilitadas por el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la U.M.S.N.H. Las columnas de flotación diseñadas y usadas para este trabajo se encuentran en esa misma dependencia de la Universidad Michoacana.

Se hizo la comparación de la fibra obtenida mediante este proceso con la fibra virgen, para evaluar la degradación de la misma.

Una vez lograda la obtención de papel reciclado y realizada la caracterización de las fibras del papel elaborado por recicló, se evaluó y concluyo sobre el logro de los objetivos específicos propuestos para este trabajo y se hizo una propuesta sobre el uso del papel reciclado.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Obtener papel reciclado, a partir de papel de oficina, papel periódico y caracterizar las fibras de los papeles reciclados.

Objetivos Específicos:

- Destintado del papel utilizando una columna de flotación.
- Determinar la degradación de las fibras del papel de oficina después del proceso de destintado.
- Determinar el uso de las fibras como materia prima para la producción de papel reciclado.
- Propuesta de uso del papel reciclado.

JUSTIFICACION

La elevada generación de residuos sólidos y su manejo inadecuado ocasionan problemas de salud, una desagradable imagen de los campos y ciudades, así como la contaminación de suelos, agua y aire. Esto se debe principalmente al aumento de la población y a las formas de producción y consumo orientadas a una cultura de desperdicio.^[13]

El aumento de los papeles impresos en forma de periódicos se traduce en una mayor proporción de esta materia que debe ser absorbida por la industria de reciclado del papel y lo mismo ocurre con el papel de oficina que es desechado y va en aumento.

Reciclar consiste en devolver al ciclo productivo los residuos que pueden ser reutilizados como materia prima para la fabricación de objetos necesarios para el hombre. Ejemplos de estos residuos que pueden ser usados como materia prima para la fabricación de objetos necesarios para el hombre. Son los papeles, los cartones, los vidrios y los materiales plásticos.^[11]

Dependiendo de la calidad y limpieza del papel de desecho, aproximadamente un 75 a 95% del mismo puede convertirse en nuevos productos de papel. Además del material fibroso, el papel de desecho lleva diferentes impurezas en la pasta, de las cuales la más importante es la tinta. Si la tinta no se elimina, el papel reciclado final presenta un color parduzco o grisáceo. Por lo tanto, los procesos de reciclaje de papel modernos incluyen pasos de destintado que eliminan un máximo de un 70% de la tinta. Se utilizan dos tipos de procesos de destintado: el de lavado y el de flotación. Este último es el más común en Europa ya que se reduce a un mínimo la cantidad de aguas residuales contaminadas y las pérdidas de material fibroso, en México, aun no se usan estas técnicas razón por la cual el objeto de este trabajo es hacer un aporte ya que la recuperación de papel establece la disminución sustancial de los daños ecológicos, implicados en la manufactura del papel, y en el ahorro por la importación y / o tratamiento de las fibras vírgenes.

La industria papelera ha crecido en los últimos 10 años con base al uso creciente del papel de desperdicio (fibra secundaria), especialmente el importado de Estados Unidos. Por lo tanto, lo que suceda en los aspectos de reciclaje ese país nos afecta directamente.

En el proceso de reciclado, la separación y eliminación de la tinta del papel impreso es de vital Importancia. En el papel de oficina que se desecha para ser reciclado es donde la presencia de tintas y su eliminación de la materia prima suponen el mayor problema.

Sin embargo, la producción de pulpa celulósica no puede basarse principalmente en el papel de desperdicio, ya que conforme este se recicla, desmerece la calidad de la fibra.^[12]

Debido a esto es conveniente conocer las características de las fibras provenientes de diferentes tipos de papel reciclado para así, poder determinar el uso que se le puede dar para la fabricación de los diferentes tipos de papel.

Materiales como son: cajas de cartón para embalajes; bandejas para el transporte de productos frágiles, como huevos y frutas; cajas para embalar productos de exportación; artículos para el estudiante, como cuadernos, blocks y agendas, y papeles para oficinas, constituye un listado que notifica de la importancia de todos y cada uno de estos artículos de uso habitual.

Se llama productos de papel a todos aquellos artículos para cuya fabricación se utiliza el papel como materia prima. La importancia y utilidad de estos productos es indiscutida, por cuanto forman parte de la mayoría de los ambientes cotidianos del ser humano, aportándole funcionalidad, comodidad, orden, higiene y protección de otros productos.^[11]

I. INTRODUCCION

El papel se compone de fibras vegetales, es decir, de materia orgánica, o lo que es lo mismo, de elementos que han estado vivos. ^[7]

El papel es un material en forma de hojas delgadas que se fabrica entretejiendo fibras de celulosa vegetal. El papel se emplea para la escritura, la impresión, para el embalaje, el empaquetado, y para numerosos fines especializados que van desde la filtración de precipitados en disoluciones hasta la fabricación de determinados materiales de construcción. El papel fue un material básico para la civilización del siglo XX, y en este nuevo siglo su uso es esencial, el desarrollo de maquinaria para su producción a gran escala ha sido, en gran medida, responsable del aumento en los niveles de alfabetización y educación en todo el mundo. ^[6]

Al utilizar papeles reciclados en la elaboración de otros productos manufacturados, se logran significativas reducciones en energía, madera y consumo de agua, también en la emisión de contaminantes del aire y del agua, así como la disminución de los desechos sólidos. Se reduce la cantidad de madera necesaria para producir papel, reduciendo los impactos adversos de la silvicultura comercial. El proceso de fabricación de papel reciclado es generalmente más limpio y más eficiente que la fabricación de papel virgen, al usar menor cantidad de energía, y la menor emisión de contaminantes del aire y del agua. Reciclar el papel reduce la cantidad de desechos sólidos que tienen que ser recolectados, y transportados para su disposición final en los rellenos sanitarios. Además que en la descomposición del papel se genera metano, gas generador del efecto invernadero. Una tonelada de papel reciclado reduce:

- El consumo de 17 árboles adultos.
- 2.3 m³ de desechos sólidos (basura).
- 32,000. litros de agua
- 4200 Kwh. de electricidad.
- 27 Kg. de contaminantes del aire y del agua (cloro, CO₂, O₂ y H₂SO₄) ^[4]

El alcance de la importancia de la industria de reciclado puede entenderse cuando se tiene en cuenta que este producto proporciona una tercera parte de la fibra utilizada por las fábricas de papel y cartón en los Estados Unidos. Se debe tener en cuenta que el papel de desperdicio es un material sustituto de la pulpa de madera. En los grados más altos de calidad de papel, el desperdicio sustituye cantidades variables de pulpa virgen. Esta sustitución esta gobernada por la naturaleza del desperdicio, en relación con el de la pulpa virgen.^[9]

De particular importancia es el proceso de destintado del papel para el recuperado, el cual involucra varios fenómenos interfaciales, los cuales incluyen la “limpieza” de la fibra, es decir la remoción de la tinta adherida a la fibra, lo que tiene que ver con el fenómeno de detergencia, y con la dispersión de las partículas de tinta y su separación ya sea por flotación o lavado. La separación por flotación puede hacerse usando celdas de flotación o columnas de flotación.

Las columnas de flotación son reactores verticales en donde se alimenta un liquido o una pulpa acuosa formada por partículas de sólidos, previamente procesado en trituradoras y molinos, dispersas en agua. Asimismo, se alimenta cerca del fondo de la columna una fase gas, a través de un dispersor, en la forma de pequeñas burbujas cuyo tamaño puede variar dependiendo de cada aplicación particular.

La columna de flotación se usa, fundamentalmente, como una herramienta de separación de fases específicas dispersas en un medio continuo acuoso, mediante sus interacciones con la superficie de burbujas de gases.^[14]

Este trabajo propone la posibilidad del destintado de papel de desecho para lograr un producto sustitutivo de la celulosa mediante el uso de reactores columnares que trabajan por flotación y proporciona información relevante sobre las características de la fibra destintada.

II. ANTECEDENTES

2.1. Reciclado de Papel.

Como consecuencia de la creciente cantidad de desechos en los países industrializados, la necesidad de recuperar el papel de desperdicio se ha incrementado, esto esta motivado por dos razones, una de carácter económico, ya que el material reciclado es una materia prima más barata que la original y otra de carácter ecológico, que tiene que ver con la acumulación o eliminación de “basura” (manejo de desechos sólidos), debido a los problemas encontrados para la disposición final de los mismos. La industria del papel en todo el mundo, tiene muchos años de experiencia en cuanto al reciclaje y reutilización de los productos de papel, y las fibras recicladas representan la mayor parte del insumo de celulosa en la manufactura de nuevo papel.

El reciclaje de papeles proporciona innumerables beneficios al medio ambiente y a la sociedad, a saber:

- a) Reduce el volumen de residuos sólidos urbanos por disponer en vertederos, lo que aumenta la vida útil de los mismos.
- b) Economiza 78% de energía y consume 50 veces menos agua que la que sería consumida para la obtención del mismo producto a partir de la celulosa virgen, proveniente de madera de eucalipto o pino, plantados para ese fin.
- c) Sustenta una cadena de miles de personas, conocidos como recogedores ambulantes que recogen cartones, diarios y otros papeles en calles, establecimientos comerciales y domicilios, además de los chatarreros y depósitos de recortes, que compran residuos de papel en imprentas y editoras, y realizan la clasificación y compactación necesarias para el encaminamiento posterior a las industrias recicladoras.

No todo el papel usado puede utilizarse para reproceso, la evaluación del papel se hace en relación a su uso previo como se aprecia en la tabla (2.1.) donde podemos observar que tipo de papel es aceptable para ser reciclado.

Tabla 2.1. Papeles reciclables y no reciclables.

Es papel reciclable	No es papel reciclable
Periódico	Papel y cajas con revestido de plástico o cera
Cartulina	Cajas para alimentos congelados
Cajas para cereales y galletas	Cajas para comidas microondas
Cajas para 6 unidades (six-pack)	Forros para cajas de cereal
Cartón, cajas corrugadas	Libros
Bolsas de papel (café) para compras de supermercado	Encuadernaciones engomadas o pegadas
Revistas	Toallas y servilletas de papel, papel de seda
Papel brillante	Platos de papel, papel sucio
Material publicitario recibido por correo	Notas con dorso pegante o adhesivas
Papel de escritorio y sobres	Papel carbón, papel térmico para el fax
Todo papel de alto grado y sin revestimiento	Cajas de papel de aluminio
Papel para carpetas/cuadernos, cualquier color	Envolturas para comidas instantáneas
Directorios telefónicos	Bolsas de comida para animales domésticos

El papel recuperado para reciclar puede seguir dos caminos: Reciclado convencional con posterior producción de papel de baja calidad; y reciclado con destintado para producción de pulpa de alta calidad como sustituto de la pulpa virgen.

El reciclado convencional es el preferido para el porcentaje que se recupera en México y el resultado del mismo es un papel gris, más áspero y con poco valor agregado.

El reciclado con destintado, hace años que se practica en Europa y otros países como Japón, y Estados Unidos.

La estrategia en el reciclaje del papel de desperdicio en la actualidad, es incorporar papeles usados de alta calidad en la materia prima para la producción de nuevo papel. Sin embargo el interés está centrado, concretamente, en el uso de desperdicio para producir papeles gráficos de alta calidad. En estas aplicaciones, el proceso de limpieza y destintado de la pulpa de papel de desperdicio, es esencial.

La desfibración y el destintado de papel están sujetos a multitud de variables y la heterogeneidad de las tintas es una de ellas, la cual sumada a la diversidad de papeles hacen que la ingeniería del proceso se caracterice por su complejidad y difícil control. Si a esto se

suma el hecho de que en México no hay clasificación alguna del papel (como de ningún otro residuo sólido) el desafío es todavía mayor.

El control de los desechos tóxicos involucrados en el destintado (mezcla de tintas, fibras cortas, químicos de recubrimiento y sellantes de papel), implica llevar a cabo tratamientos primarios y secundarios antes de su deposición. En razón de ello, el papel reciclado resulta costoso, aunque la materia prima pueda ser fácilmente adquirida.

Para desfibrar y destintar se utilizan en México los comúnmente llamados procesos de cocción y lavado. El ciclo de cocción varía de planta a planta, dependiendo del equipo, materia prima (tipo de papel), reactivos y la calidad del producto. La selección de reactivos depende en gran parte de la naturaleza del papel de desperdicio ya que obviamente los reactivos empleados deben ser capaces de convertir el papel en la pulpa destintada de calidad aceptable.

Existe una gran variedad de reactivos para el destintado como son, sosa cáustica, carbonato de sodio, silicato de sodio, recientemente se utilizan hidrosulfito de zinc, peróxido de sodio y peróxido de hidrógeno, estos últimos aplicados a las pastas mecánicas. En ocasiones se adicionan jabones, ó ácidos grasos mezclados con álcalis.

Se utiliza una etapa llamada prelavado, en la etapa siguiente a la desfibración, la pulpa se diluye en agua y pasa a través de pantallas perforadas con agujeros del tamaño adecuado para retener solamente las partículas más grandes. La suspensión pasa después a través de filtros y de procesos de lavado, en los cuales se separan y se desechan las impurezas, dependiendo de su tamaño, forma o densidad. El lavado centrífugo y las pantallas a presión usadas para estas funciones tienen una selectividad y, como resultado, la pérdida de fibras puede ser elevada. Para minimizar estas pérdidas, se emplean sistemas de etapas múltiples o sistemas de lavado en cascada, pero aún éstos tienen una efectividad limitada en eliminar las partículas de tinta y de adherentes.

Destintado por lavado: En este proceso, la pulpa se diluye en agua, la cual se elimina después a través de una serie de pantallas, que también permiten el paso de la mayor parte de partículas de tinta, mientras que retienen las fibras de papel. Diferentes agentes dispersantes son usados para ayudar al rompimiento de las partículas de tinta, previniendo su aglomeración en las pantallas. El proceso es por lo tanto relativamente poco exitoso para quitar las capas de tinta que están fuertemente adheridas, por ejemplo aquellas que pasaron por curado por radiación y también implica una pérdida considerable de fibras, relleno y pigmentos. Para la

mayoría de las aplicaciones, excepto en la producción de papeles faciales, (en la cual es deseable eliminar todos los pigmentos y rellenos) las pérdidas resultantes no son por lo tanto aceptables. Al mismo tiempo, los grandes volúmenes de agua empleada y la baja concentración de contaminantes en el filtrado, requieren procesos adicionales de limpieza de gran escala, si es que el agua va a ser reutilizada y si es que se busca evitar riesgos hacia el medio ambiente. Un proceso de limpieza muy utilizado para este propósito, es la microflotación o flotación de refuerzo. Permite la recuperación de lodos, que representan hasta un 40% del insumo al equipo de pulpeo. Estos deben ser después reciclados o enviados a disposición final. Con el lavado únicamente se logra remover entre el 70 y 80% de las partículas de tinta de las fibras. Este método es más efectivo en la remoción de partículas de tinta cuyo tamaño es menor que 15 μm .

En este sentido, la selección y desarrollo de nuevas técnicas de destintado, constituyen uno de los aportes más importantes para la producción de papel.

Destintado por flotación: Este es el proceso comúnmente preferido por la comunidad Europea para el destintado y se basa en el paso de burbujas de aire a través de una baja concentración de pulpa, en la cual están dispersas partículas de tinta. La tinta sube a la superficie unida a las burbujas de aire y así la espuma resultante puede ser fácilmente eliminada. Para que este método funcione, las tintas deben ser altamente hidrofóbicas y el flujo del aire, así como la turbulencia resultante, cuidadosamente controlados para asegurar que sean recogidas la mayor parte de partículas de tinta. También, es evidente que para que la tinta suba a la superficie, la densidad del agregado partículas de tinta y burbujas de agua, deberá ser significativamente menor que la de la solución. El éxito de este método depende claramente de los tipos de tinta encontrados y de su química superficial. El resultado es una espuma altamente concentrada, la cual puede contener gran cantidad de finos y rellenos, lo cual probablemente presenta también problemas de disposición final.

En este trabajo de investigación, se evaluó una de las técnicas de separación más novedosa y eficaz, conocida como “Flotación”.

2.2. Uso de las columnas de flotación en el reciclaje de papel.

Hoy en día, se procesan desechos de papel para recuperar las fibras, empleando flotación por espuma para separar las tintas y arcillas que contiene el papel usado.

Existen diversas posibilidades de empleo de la tecnología de las columnas de flotación en procesos de recuperación de valores reciclables, en sistemas que pueden ser procesados como dispersiones del tipo liquido-multifase. Un caso que se presenta como ejemplo conveniente es la industria papelera, a la cual en los países industrializados se le exige que su producción de papel tenga una porción considerable de fibra de papel reciclada, con el objetivo de disminuir considerablemente el consumo de madera, y así preservar las reservas forestales.

El uso de las columnas de flotación como método de destintado se basa en la flotación selectiva de las partículas de tinta, como consecuencia de la diferencia entre sus propiedades físicas y fisicoquímicas de superficie y las correspondientes a las fibras de celulosa.

2.3. Descripción de las columnas de flotación.

La columna de flotación como tal, es una tecnología desarrollada durante los años 60's. aplicada en el beneficio de minerales, se llevo a la practica comercial por primera vez en el continente Americano, en el año de 1981 esta primera instalación comercial se realizo en Les Mines Gaspé (Québec, Canadá), por la *Column Flotation Company of Canada*, y su aplicación se dedico a la limpieza da molibdenita.

Las columnas de flotación debe su nombre a su forma en su diseño, esta es vertical. La columna de flotación se usa, como una herramienta de separación de fases específicas dispersas en un medio continuo acuoso, mediante sus interacciones con la superficie de burbujas de gases, comúnmente aire, que también se dispersan en un medio acuoso. Por tanto en este proceso de separación, se hace uso del comportamiento hidrofóbico de las superficies de aquellas fases dispersas, de forma tal que se pueda propiciar su adherencia a la superficie de las burbujas de gas ahí presentes. Una vez que la superficie hidrofóbica se ha adherido a la burbuja, si el agregado burbuja-fase hidrofóbica presenta una densidad relativa menor que aquella del medio, este agregado flota hasta la superficie del liquido en la columna, en donde

junto con otras burbujas se colectan formando una espuma que sale del sistema a través de un vertedero localizado en la parte superior de la columna.

La columna de flotación normalmente es operada en régimen de flujo continuo en contracorriente con respecto al líquido o pulpa y al gas; por lo que el líquido se alimenta a cierta altura, normalmente a una posición aproximada a $1/3$ de la altura medida desde el borde del vertedero de la columna; esta alimentación sigue un camino natural descendiente debido al efecto de la gravedad, en contra-corriente con respecto al movimiento ascendente de las burbujas del gas, además de que la descarga de las colas está localizada en el fondo de la columna. Estas características del movimiento de las fases en la columna, aumentan las probabilidades de que se presenten colisiones entre las burbujas del gas y la superficie de las fases que se desean separar.

La columna de flotación está constituida esencialmente por dos componentes zona de colección y zona de lavado como se observa en la figura (2.1).

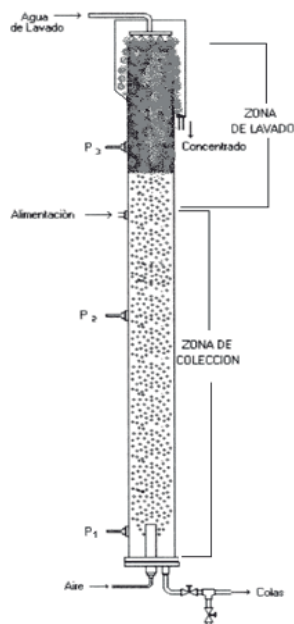


Figura 2. 1. Columna de flotación.

Zona de colección:

Región en donde ocurre el proceso de colección debido a la colisión de la superficie de las burbujas con las partículas hidrofóbicas, formándose una nube de agregado burbuja-partícula, esta región está comprendida entre el punto de inyección del gas en la columna y por la interfase zona de colección-zona de espumas.

Zona de Lavado:

También llamada zona de espuma. Zona donde se forma un lecho fluidizado de espuma constituida por la acumulación de los agregados burbuja partícula, y que además contienen sólidos hidrofílicos atrapados mecánicamente en ese lecho fluidizado.

Para este caso de destintado de papel en columnas de flotación el producto de las colas será el más valioso y el de corriente de espumas es el producto de desecho el cual contiene la tinta separada de la pulpa.

2.4. Definición de variables de operación.

Para explicar el comportamiento de la zona de colección de las columnas de flotación, será necesario relacionar su operación al concepto de fracción volumétrica de gas retenido, así como a la velocidad superficial de gas. La idea de fracción de gas retenido se refiere a la fracción del gas contenido en un volumen determinado de una mezcla gas-liquido o gas-pulpa, y este concepto está ligado al de velocidad superficial de gas.

2.4.1. Velocidades de fase.

El destintado de papel de desperdicio es un proceso complejo que involucra varios fenómenos interfaciales. Dentro de la columna tendremos un gas que es aire; dos sólidos diferentes las partículas de tinta y las fibras celulósicas; y agua. Los cálculos de la velocidad del gas son primordiales para la operación de las columnas de flotación.

2.4.1.1. Velocidades superficiales.

Velocidad superficial del gas:

Es el gasto volumétrico de gas dividido entre el área transversal normal a la dirección de su flujo; en columnas de flotación, el área transversal normal a la dirección del flujo del gas es considerada generalmente como el área de la sección transversal de la columna y esta representada por la ecuación (1).

$$J_g = \frac{Q_g}{A_c} \text{-----} (1)$$

Donde:

J_g es la velocidad superficial del gas cm/seg

Q_g es el flujo volumétrico del gas cm^3/seg

A_c es el área transversal de la columna cm^2

Velocidad superficial de pulpa:

Es la cantidad de pulpa que se alimenta a la columna por unidad de tiempo y se representa por la ecuación (2).

$$J_L = \frac{Q_L}{A_c} \text{-----} (2)$$

Donde:

J_L es la velocidad superficial de la pulpa cm/seg

Q_L es el flujo volumétrico de la pulpa cm^3/seg

A_c es el área transversal de la columna cm^2

Por analogía, las velocidades superficiales de diferentes fluidos pueden ser introducidas en términos de la definición general, lo que se observa en la ecuación (3).

$$J_i = \frac{Q_i}{A_c} \text{-----} (3)$$

En donde “i” puede ser flujo neto de agua ascendente o descendente a través de la espuma, agua de lavado, colas de flotación, etc.

2.4.1.2. Velocidades relativas entre fases (de deslizamiento)

La velocidad relativa entre fases es la velocidad relativa entre el líquido y las burbujas y esta representada por la ecuación (4).

$$U_{sb} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} \pm \left\{ \frac{J_l}{(1 - \varepsilon_g)} \right\} \text{-----} (4)$$

En donde, de manera, convencional, el símbolo (positivo) es tomado cuando el régimen de flujo es en contracorriente, y el símbolo (negativo) es tomado cuando el sistema esta en régimen de flujo paralelo.

Donde:

J_g es la velocidad superficial del gas cm/seg

Q_g es el flujo volumétrico del gas cm^3/seg

J_l es la velocidad superficial del líquido en la zona de colección cm /seg

ε_g es la fracción de gas retenido en (%)

La velocidad relativa entre fases se relaciona con las variables del sistema. Para los tamaños de burbuja de interés en procesos de flotación ($d_b \leq 2 \text{ mm}$, $R_{eb} \leq 500$).

El diámetro de burbuja esta representado por la ecuación (5).

$$d_b = \left[\frac{18\mu_l U_{sb} (1 + 0.15R_{eb}^{0.687})}{\{g(\rho_l - \rho_g)(1 - \varepsilon_g)^{m-1}\}} \right]^{1/2} \text{-----} (5)$$

Donde:

d_b es el diámetro de las burbujas en (cm)

g es la aceleración de la gravedad en (cm/s^2)

μ_l es la viscosidad del liquido (g/cm)

ρ_l es la densidad del liquido (g/cm^3)

ρ_s es la densidad del sólido (g/cm^3)

El número de Reynolds de la burbuja se representa por la ecuación (6).

$$R_{eb} = \frac{d_b U_{sb} \rho_l (1 - \varepsilon_g)}{\mu_l} \text{-----} (6)$$

$$y, m = \left\{ 4.45 + 18 \left(\frac{d_b}{d_c} \right) \right\} R_{eb}^{-0.1} \quad \text{si } 1 < R_{eb} < 200$$

Donde

d_c es el diámetro de la columna en (cm)

$$m = 4.45 R_{eb}^{-0.1} \quad \text{si } 200 < R_{eb} < 500$$

Este sistema de ecuaciones debe resolverse interactivamente conociendo algunas de las variables de operación como J_g , J_l , y ε_g . en sistemas de dos fases, agua-aire, el término ρ_g (la densidad de la burbuja) en el primer componente de la ecuación (6), se reduce a cero debido a que es despreciable su valor.

El diámetro de burbuja se puede calcular resolviendo iterativamente la ecuación (4), (5) y (6).

2.4.2. Cantidades relativas de las fases

Tanto en columna de flotación industriales como de laboratorio, los flujos de alimentación, colas y concentrado, definen a los parámetros de tiempo de residencia del sistema de flotación, y consecuentemente, la rapidez con la que el sistema alcanza los fines deseados, en términos de la separación misma.

2.4.2.1. Flujos de alimentación, colas y concentrado

Estos parámetros de operación se controlan en términos de las capacidades de bombeo de

alimentación, colas y de agua de lavado de la operación particular. El muestreo de cada corriente es necesario para poder hacer los balances de materia, para definir las recuperaciones por componente y familias de tamaños de partículas.^[14]

El balance de materia y por componente se debe cumplir según las siguientes ecuaciones. Para el balance general ecuación (7), para el flujo de pulpa ecuación (8) y para el balance de agua ecuación (9).

Donde:

Entrada = Salida

$$A + L = P + C \text{ ----- (7)}$$

$$A = C + S \text{ ----- (8)}$$

$$A + L = C + S \text{ ----- (9)}$$

Donde

A es la alimentación en (cm³/seg)

C es la corriente de colas “material valioso” (cm³/seg)

S es el concentrado o desecho (cm³/seg)

L es la corriente de agua de lavado (cm³/seg)

2.4.2.2. Contenido de aire, sólido y líquido.

Cuando se introduce gas en una columna de líquido, o pulpa, el volumen de estos es desplazado en términos de su reemplazo por la cantidad correspondiente de gas introducido.

La fracción del volumen desplazado es la fracción de gas definido como ϵ_g . Y su complemento ($1 - \epsilon_g$), es la fracción volumétrica de líquido, o pulpa, retenido en la columna.

Fracción volumétrica de gas

La fracción volumétrica de gas retenido en la columna, se puede medir de diferentes maneras.

a) Se puede medir como la fracción volumétrica de gas retenido en toda la columna, simplemente midiendo el volumen de líquido desplazado al introducir el gas en el sistema.

Esta técnica carece de validez práctica, en sistemas de operación continuos, y con la presencia de espuma.

b) Otra forma de estimar la fracción de gas retenido en la columna es mediante la medición de la diferencia de presión hidrostática ΔP , entre dos puntos localizados a diferentes alturas de la columna (en la zona de colección) cuya separación es ΔL lo que se aprecia en la figura (2.2).

El caso practico de gas-pulpa se puede considerar, suponiendo por una parte, que el componente dinámico de la presión es despreciable, y por otra parte, que las burbujas están ligeramente cargadas con sólidos y que la densidad del agregado burbuja-partícula se puede despreciar.

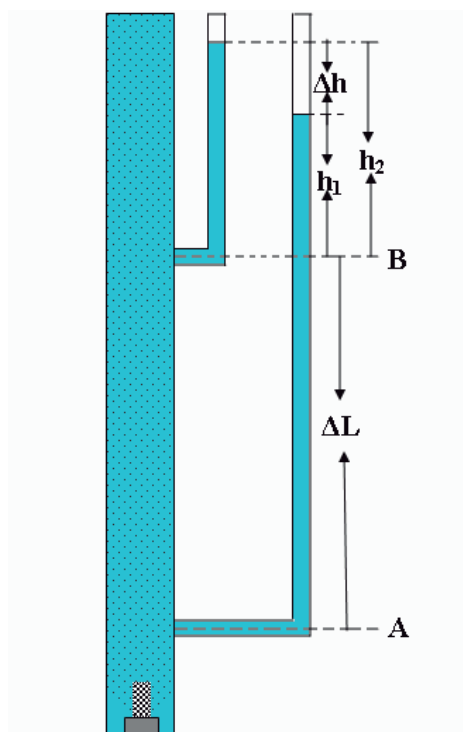


Figura 2.2. Medición de la fracción de gas por diferencia de presión.

En los puntos A (nivel inferior) y B (nivel superior) de medición en la columna, la presión por encima de la atmosférica es:

$$P_A = \rho_{sl} g L_A (1 - \varepsilon_{gA})$$

$$P_B = \rho_{sl} g L_B (1 - \varepsilon_{gB})$$

En donde ρ_{sl} es la densidad de la pulpa y, ε_{gA} y ε_{gB} , son las fracciones de gas retenido en A y B, respectivamente. El producto $L (1 - \varepsilon_g)$ es equivalente a la altura de la pulpa sin gas. Por lo tanto, la diferencia de la presión entre A y B, ΔP , es como se observa en la ecuación (10)

$$\Delta P = \rho_{sl} g \Delta L (1 - \varepsilon_g) \text{-----} (10)$$

En donde ε_g , es la fracción de gas retenido entre A y B, el cual puede ser calculado simplemente midiendo la diferencia de presión entre los puntos separados por ΔL , debe considerarse aquí que la fracción de gas representa solamente aquella medida entre A y B; midiendo la presión a diferentes intervalos a lo alto de la columna se puede obtener un perfil de la fracción de gas retenido en la columna.

Si se usa manómetros de agua para medir la presión.

Entonces:

$$P_A = \rho_w g (\Delta L + h_1)$$

En donde h_1 es la altura que corresponde a la medición en A.

$$P_B = \rho_w g h_2$$

En donde h_2 es la altura que corresponde a la medición en B.

Y ΔP queda como:

$$\Delta P = \rho_w g (\Delta L - \Delta h) \text{-----} (11)$$

Si Δh es positivo, el nivel del manómetro superior es mas alto que el inferior, y significa que la densidad de la dispersión en la columna es menor que la densidad en el agua.

Entonces la fracción de gas retenida en la columna esta representada como se indica en la ecuación (12).

$$\varepsilon_g = 1 - \left\{ \left(\frac{\rho_w}{\rho_{sl}} \right) \left(1 - \left[\frac{\Delta h}{\Delta L} \right] \right) \right\} \quad \text{-----} \quad (12)$$

En un sistema agua-aire, esta expresión se reduce a:

$$\varepsilon_g = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right) \quad \text{-----} \quad (13)$$

Que es la que se utiliza para determinar la fracción de gas.^[10]

2.4.3. Área superficial de burbuja

El área superficial de burbuja se refiere a la superficie total de burbujas disponibles para atrapar partículas de tinta. Esta en función de la fracción de gas y del diámetro de la burbuja, se determina utilizando la ecuación (14).

$$S_b = \frac{6J_g}{d_b} \quad \text{-----} \quad (14)$$

2.4.4. Tiempo de residencia de la pulpa

Es el tiempo de residencia de la pulpa en al zona de colección, y esta determinado por la siguiente ecuación (15).

$$\tau = \frac{V_{zc}}{Q_c} \text{-----} (15)$$

Donde:

τ es el tiempo de residencia de la pulpa en (seg)

V_{zc} es el flujo de la corriente de colas de la columna (cm^3)

Q_c es el flujo de la corriente de colas de la columna (cm^3/seg)

Durante la operación de la columna, deben de transcurrir dos tiempos de residencia después de cualquier cambio en las variables, para asegurar que el sistema se encuentre estable.

2.4.5. Recuperación del material valioso

La recuperación del material valioso esta relacionada por el flujo volumétrico de las colas con el flujo volumétrico de la alimentación por la siguiente ecuación (16).

$$\% \text{ Recuperación} = \left(\frac{Q_c}{Q_A} \right) \times 100 \text{-----} (16)$$

Donde:

Q_A es el flujo de la pulpa en la alimentación (cm^3/seg)

Q_C es el flujo de pulpa en la corriente de colas (cm^3/seg)^[14]

2.5. Química de la flotación.

-Clases de agentes químicos.

Los compuestos utilizados:

Colector y acondicionador de la pulpa. Se utiliza para desfibrar el papel durante el pulpeo, también actúa como colector.

Espumante. Tiene la finalidad de disminuir la tensión superficial de la burbuja para evitar que se rompa y libere la partícula una vez atrapada.

2.6. Mecanismo de formación agregado burbuja-partícula de tinta.

Para que la flotación sea efectiva las partículas de tinta deben de mantenerse dentro de un rango optimo de aproximadamente 10 a 100 micrómetros (Ferguson, 1992). En el proceso de destintado por flotación las partículas de tinta deben ir unidas a las burbujas, las partículas de tinta son atrapadas en la burbuja de aire, debido a que la mayoría de tintas utilizadas en impresión están hechas con base en aceite, por lo tanto son hidrofóbicas y difíciles de dispersar.^[10] Y así podemos tener el agregado burbuja-partícula hidrofóbica esto se observa en la figura (2.3).

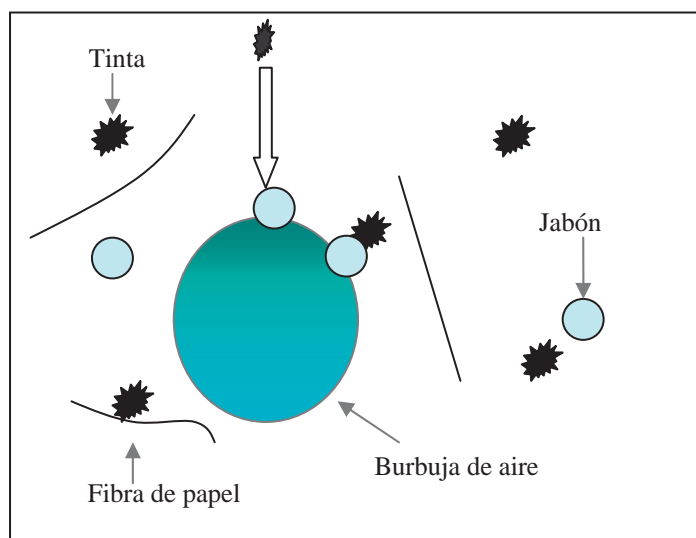


Figura 2.3. Mecanismo agregado burbuja-partícula de tinta.

2.7. Celulosa.

La existencia de la celulosa como el material común de las membranas celulares de la planta primero fue reconocida por Anselm Payen en 1838. Ocurre en forma casi pura en fibra de algodón y conjuntamente con otros materiales, tales como lignina y las hemicelulosas, en madera las hojas y los tallos de las plantas, etc. Siendo la madera el material lignocelulósico más utilizado en la obtención de pulpa (fibras) para fabricar papel.

2.7.1. Estructura de la celulosa.

Desde el punto de vista estructural, la celulosa es un polímero formado por unidades de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos β (1,4), como se ilustra en la figura (2.4), en promedio tiene 7 000 unidades de glucosa, pero puede contener hasta 12 000.^[2]

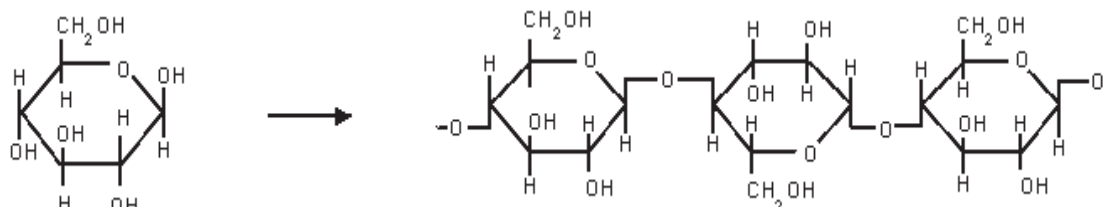


Figura 2.4. Estructura de la celulosa.

La formula química de la celulosa es $(C_6H_{10}O_5)_n$, en donde n es el grado de polimerización (conocido como DP, degree of polymerization), es decir, el numero de unidades de glucosa que se unen para formar cadenas largas sin ramificaciones que integran las fibras.^[1] El peso molecular de la celulosa varia de 100 000 a 1000 000.^[15]

2.7.2. Clasificación de la celulosa.

Alrededor del año 1900, Cross y Bevan desarrollaron un procedimiento empírico para clasificar las diferentes fracciones que resultaban de tratar la pulpa celulósica con soluciones de hidróxido de sodio. Mediante este procedimiento queda una fracción insoluble llamada alfa celulosa, que es una celulosa de cadena larga y con un alto peso molecular. En la fracción soluble se halla la beta celulosa, que se encuentra degradada y con un DP entre 15 y 90 y se precipita al acidificar la solución, y la gama celulosa, que esta formada principalmente de hemicelulosas.

2.7.3. Propiedades de la celulosa

La celulosa pura, que se halla presente en todos los vegetales superiores tabla (2.1)., es una sustancia blanca, algo translúcida y con una longitud aproximada de 1.03 nm. Constituye alrededor del 40% de la madera y del bagazo de caña (las principales materias de la industria del papel). En el aspecto químico, la celulosa es el único constituyente fibroso de los

materiales lignocelulósicos, es completamente insoluble en agua, éter, ácidos y álcalis diluidos. A temperatura ambiente es inalterable en contacto con el aire; pero cuando se encuentra húmeda y en estado impuro, se descompone lentamente.

Tabla 2.2. Contenido de celulosa en diferentes vegetales.

Material	Celulosa (%)
Algodón	95-99
Madera	40-50
Bambú	40-50
Bagazo	35-40
Musgo	25-30
Corteza	20-30

Las fibras de madera, linter o bagazo que se obtienen de los procesos de pulpeo al sulfato, sulfito o sosa se denominan en conjunto pulpa celulósica. Esta pulpa puede purificarse mediante reacciones que se desarrollan en el sistema de blanqueo, alcanzando altos contenidos de celulosa; a este material se le da el nombre de celulosa técnica, y posee propiedades diferentes según su origen y los métodos de obtención y refinación.

2.7.3.1 Reactividad y accesibilidad.

Cada unidad β -D-glucopiranososa que integra la cadena de la celulosa tiene tres grupos hidroxilo reactivos dos secundarios (HO-2 y HO-3) y uno primario (HO-6). Debido a los efectos inductivos de los sustituyentes vecinos, la acidez y la tendencia a la disociación se incrementan de acuerdo con la serie: HO-6 < HO-3 < HO-2.

2.7.3.2. Hinchamiento y Disolución

La celulosa se hincha con diferentes solventes; la extensión del hinchamiento depende del solvente y de la naturaleza de la muestra de celulosa.

Cuando las fibras de celulosa anhidra se exponen a la humedad, absorben agua y la sección cruzada de las fibras se incrementa debido al hinchamiento. A un 100% de humedad relativa este hinchamiento corresponde aproximadamente a un 25% de incremento en el diámetro de la fibra. Se tiene otro incremento de 25% cuando el hinchamiento tiene lugar al sumergir las fibras en agua. En la dirección longitudinal el cambio es muy pequeño. Los solventes más importantes de la celulosa son los complejos metálicos de bases orgánicas; los más comunes son la cuprietilendiamina (CED) y la etilendiamina de cadmio (Cadomex).^[12]

2.8. Hemicelulosas y Ligninas

La celulosa nunca se presenta en forma pura. En lugar de ello, por lo general se encuentra embebida en lignocelulosa (una matriz amorfa de hemicelulosa y lignina que contiene celulosa ordenada), constituyendo las paredes celulares de fibras.

2.8.1. Hemicelulosas.

Las hemicelulosas están formadas por polisacáridos, por lo general ramificados, de varios azúcares y algunos ácidos irónicos, los cuales se pueden extraer con álcali a partir de lignocelulósicos.

2.8.2. Ligninas.

Las ligninas son polímeros aromáticos de enlace altamente cruzado, que carece de unidades de repetición regular debido a que se forman por condensación de radicales libres.

La separación de la lignina de las fibras de la madera es el proceso básico de la industria del procesamiento de la pulpa en la elaboración del papel y celulosa. El proceso para la obtención de la pulpa consiste en separar y recuperar fibras celulosicas deslignificadas de material vegetal fibroso, mediante métodos mecánicos, químicos o ambos.^[8]

2.9. Procesos de pulpeo.

Químico: Cualquier proceso químico de pulpeo consiste esencialmente en mezclar la materia prima fibrosa (reactante) con una solución acuosa de sustancias inorgánicas (reactivo) denominada licor de cocción, cuya composición varía de acuerdo al peso que se utilice, y también al uso que se le vaya a dar a la pulpa; por ejemplo, fabricación de papel blanco de escritura o derivados de la celulosa, como rayón. La mezcla resultante se alimenta entonces a un reactor o digestor de forma (por lotes o en continuo), se la aplica calor, con lo que el material lignocelulósico sufre un proceso de cocción en el que se degrada la lignina, que se vuelve soluble en el medio (el cual puede ser alcalino o ácido), y se liberan las fibras. Si se utiliza una cantidad alta de reactivos, puede ocurrir la degradación de los carbohidratos (entre los que se encuentra la celulosa); por el contrario, si es baja, la disolución de lignina se verá limitada. Por esta razón, los reactivos se añaden en función de la cantidad de lignina por eliminar para obtener una pulpa con las mejores propiedades.

Mecánico: Se puede obtener pulpa presionando troncos contra la superficie de un cilindro de piedra que gire a alta velocidad, o alimentando astillas a un refinador. En el pulpeo mecánico las fibras se desgarran de la madera, por lo que varían la longitud y composición, además de conservar prácticamente inalterada su composición química (excepto por la eliminación de los compuestos solubles en agua); en consecuencia, las fibras no existen como entidades individuales sino como grupos (la lignina aun las mantiene unidas entre si) y fragmentos. Por lo tanto, la pulpa mecánica es una mezcla de haces fibrosos, fibras individuales y fibras rotas. Al conservarse en la pulpa casi toda la lignina presente en la madera, el rendimiento se eleva a un 90 y 95%, en contraste con el casi 50% de la pulpa química. El papel hecho a partir de la pulpa mecánica es suave, voluminoso, absorbente y opaco; es también débil y se puede deteriorar con el tiempo, especialmente con la luz solar.

Debido a que en la pulpa mecánica las fibras se encuentran rotas y desgarradas, pueden absorber rápidamente la tinta en las prensas rotativas de alta velocidad que se utilizan para imprimir periódicos, revistas y publicaciones similares.

Semiquímico: Un proceso semiquímico se divide en dos etapas. La primera es un pequeño tratamiento químico a las astillas de madera, aserrín y otros materiales lignocelulósicos. El objetivo de este tratamiento es el de romper los enlaces interfibrilares removiendo algunas hemicelulosas y una porción de lignina. La segunda etapa es un tratamiento mecánico con el cual se separan las fibras, aunque es normal que ocurra un pequeño rompimiento de estas.

En la figura 2.3 se destaca la morfología de la fibra y el efecto del proceso con el cual se obtuvo la pulpa.

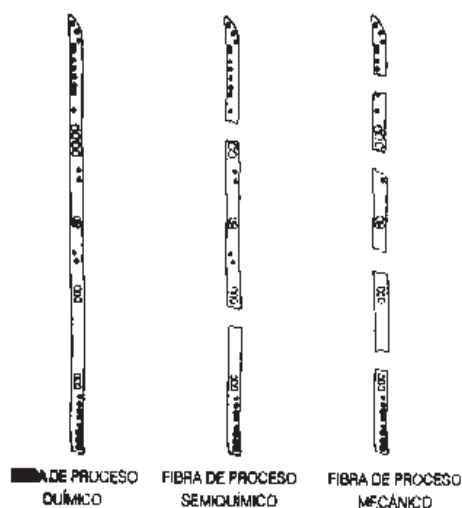


Figura 2.5. Efectos de los procesos de pulpeo sobre las fibras. ^[12]

2.10. Producción de pulpas con fibras secundarias.

La producción de pulpas con fibras secundarias implica la necesidad de volver a producir en base a papeles y cartones de desperdicio. Los dos métodos aplicados son básicamente diferentes:

- 1) Un sistema puramente mecánico, en el que intervienen empleo de desbaratadores, cernidores y separadores centrífugos.

- 2) Una combinación de sistemas químicos y mecánicos, en la que los productos químicos se utilizan en la etapa de producción de pulpa para eliminar la tinta y otros contaminantes.

2.10.1. Destintado de papel.

Para producir una pulpa blanca con base en el papel de desperdicio, de manera que sea adecuada para producir papeles para libros y otros similares, es necesario eliminar la tinta que tiene el papel de desperdicio. El proceso orientado a dicha finalidad se denomina destintado.

Son dos los pasos básicos de destintado:

- 1) Disolver o aflojar la tinta por métodos químicos.
- 2) Eliminar la tinta presente en la pulpa mediante un lavado mecánico.

Todos los sistemas de destintado consisten en las etapas siguientes:

1. Desbaratado o desfibrado en presencia de productos químicos.
2. Limpieza y depuración.
3. Lavado.
4. Eliminación de agua y espesado.

La eliminación de la tinta se logra en ocasiones por la flotación. Cuando se requiere producir pulpa blanca se aplican sistemas de blanqueo y de lavado-blanqueo.

Desde el punto de vista de la facilidad en el destintado son cuatro los principales tipos de tintas:

1. Tintas secantes con base de aceite.
2. Tintas no secantes con base de aceite.
3. Tintas con base de resina sintética.
4. Tintas metálicas con base de látex.^[3]

2.11. Pruebas físicas comunes realizadas a las hojas hechas a mano para determinar la calidad del papel.

- Gramaje.
- Calibre.
- Opacidad.
- Blancura.
- Tensión.
- Rasgado.^[14]

2.12. Peso molecular viscosimetrico.

El peso molecular es un criterio para determinar el tamaño de la cadena molecular, ya que a mayor peso molecular corresponde un mayor tamaño, y el primero puede obtenerse multiplicando el grado de polimerización por el peso molecular de la unidad repetitiva. El hecho de que exista una relación entre el tamaño y el peso tiene gran importancia ya que influye directamente sobre las propiedades del material. Por ejemplo al aumentar el peso molecular del polímero aumenta su viscosidad y su resistencia al agrietamiento, provocado por agentes activos, pero disminuye la facilidad de proceso.

Viscosidad se define como la resistencia de un líquido a fluir, es decir, la fuerza que se oponga a la deformación y movimiento de un líquido dentro de su propia masa.

En la actualidad se sabe que la relación entre la viscosidad intrínseca ($[\mu]$) y el peso molecular esta definida por la ecuación de Mark-Houwink-Sakurada, como se representa en la ecuación (18).

$$[\mu] = KM^a \text{-----} (18)$$

Los valores de a son dependientes del disolvente y la temperatura, y K constante adimensional; su valor esta relacionado con la estructura del polímero.^[1]

En la tabla (2.2) se muestran algunos de estos valores determinados para algunos polímeros.

Tabla 2.3. Parámetros para la ecuación de Mark-Houwink-Sakurada.

Polímero	Disolvente	T, °C	K X 10⁴	a
Acetato de celulosa.	Acetona	25	1.49	0.82
Polisopreno	Tolueno	25	5.02	0.67
Poliestireno	Tolueno	25	3.7	0.62
Copolimero GR-S	Tolueno	30	5.4	0.66
Metacrilato de Metilo	Benceno	25	0.94	0.76
Polisobutileno	Tolueno	25	3.6	0.64

III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El destintado del papel es un proceso de separación complejo, realizado en varias etapas. Como tal, involucra diferentes variables que pueden incidir en los resultados obtenidos. Desde el punto de vista experimental y para los objetivos del presente trabajo, no es necesario realizar un estudio detallado de la influencia de cada una de ellas. Con la realización del trabajo descrito en este capítulo se busca, además de generar una experiencia en el uso de un proceso de destintado que permita un conocimiento más sólido del mismo, comprobar la eficacia del proceso seleccionado, para ello se trabajo con columnas de flotación a nivel de laboratorio, y se aplico un proceso que incluyo las etapas de: pulpeado, flotación, y filtrado.

Para describir el trabajo experimental nos apoyamos en el diagrama de flujo que se muestra en la figura (3.1.) a continuación.

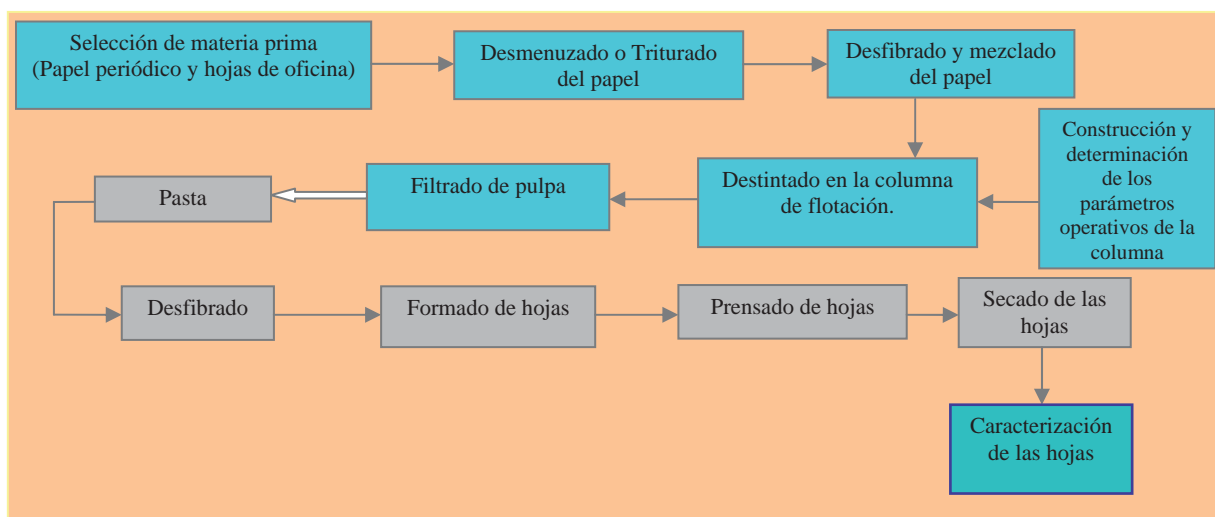


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso

En la descripción primero se aborda la construcción y determinación de los parámetros operativos de la columna de flotación, para seguir un orden con el resto de los contenidos del diagrama y deslizarnos desde la materia prima hasta el producto del proceso que son las hojas de papel reciclado para su caracterización.

3.1. Construcción de una columna de flotación a nivel laboratorio.

Se construyo una columna de material acrílico de 270 cm (2.7 m) de altura con un diámetro de 7.5 cm (0.075 m). En la base de la columna se encuentra un burbujeador del tipo rígido poroso de acero inoxidable con capacidad de 0-15 L/min, (diámetro nominal de poro de 2 μ m), de la marca GILMONT INSTRUMENTS modelo 150 MM. La entrada de la alimentación se encuentra ubicada a 168 cm (1.68 m) de la base de la columna.

La columna de flotación tiene colocados en tres diferentes puntos manómetros de agua, los cuales se encuentran a una distancia de 12 cm, 78 cm y 102 cm de la base de la columna.

Se utilizan dos bombas peristálticas MASTERFLEX modelo 7518-12 y 77601-00. Las cuales nos permiten manipular el flujo de las corrientes de (alimentación y colas).

Para el acondicionamiento de la pulpa se utilizo un tanque de 50 Lts; y para la agitación unas aspas las cuales giran con la ayuda de motor trifásico SIEMENS Tipo: RGZZSD. Como se observa en la figura (3.2).

3.2. Determinación de los parámetros operativos de la columna.

Se determinan la fracción volumétrica de gas retenido, así como a la velocidad superficial de gas para observar el comportamiento de la zona de colección de las columnas de flotación.

3.2.1. Velocidad superficial de aire (J_g , cm/seg) y fracción volumétrica de gas.

Para este experimento se trabaja con agua y espumante a 30 y 60 ppm

En el tanque desfibrador se pone agua hasta un volumen de 30 L y espumante, utilizando 0.91 ml para el experimento con 30 ppm y 1.83 ml para el experimento con 60 ppm. Se mezcla y se alimenta a la columna manteniendo un flujo de las corrientes de alimentación y colas de 0.7 cm/seg y 0.4 cm/seg, respectivamente. En estas condiciones se va aumentando el flujo de aire. Se toman las lecturas de flujo de aire y diferencias de presión en cada punto con estos valores se determina la velocidad de aire y la fracción volumétrica de agua.

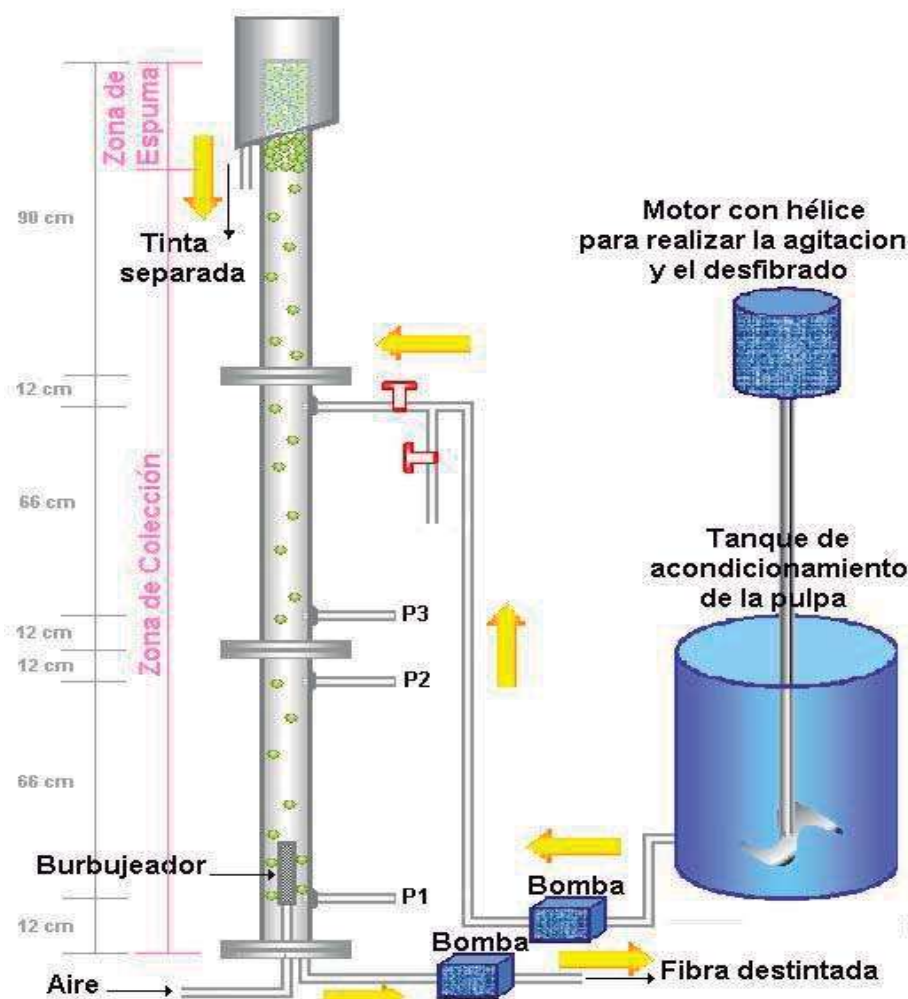


Figura 3.2. Columna de flotación y tanque desfibrador.

Nota: La columna y algunos equipos pueden ser observados en el apéndice A.

3.3. Experimentación para el destintado de papel.

➤ Selección de Materia prima:

La selección de la materia prima se hizo acorde a los objetivos que se persiguen en el presente trabajo de tesis. Se seleccionó como materia prima cuatro tipos de papeles usados, los que se clasificaron de la siguiente manera:

M1: Papel periódico

M2: 50% de papel periódico y 50% de papel oficina

M3: Papel de oficina

M4: Hojas totalmente blancas

El papel que se utilizó se seleccionó y se le eliminaron agentes extraños a él como lo son clips, grapas, polvo y otros materiales. En la figura (3.3) se aprecian papel periódico y de oficina.

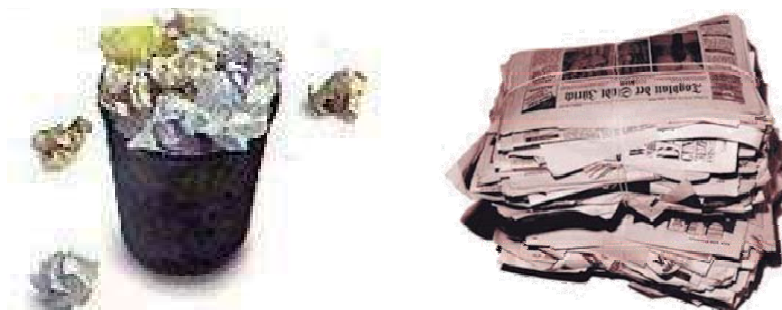


Figura 3.3. Selección y clasificación de papel

➤ Desmenuzado o triturado del papel:

Se desmenuza el papel en trozos de aproximadamente 2x2 cm, como se aprecia en la figura (3.4); posteriormente se pesa la cantidad requerida para obtener una pulpa con la consistencia de 0.8%. Para sacar los gramos requeridos de papel para esta consistencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$gr_{papel} = \frac{\%C \times V \times \rho}{100} \quad \text{Donde:}$$

%C es la consistencia

V es el volumen en (ml)

ρ es la densidad del papel en (g/ml)



Figura 3.4. Papel desmenuzado

➤ Desfibrado del papel:

Se coloca en el tanque el papel desmenuzado, se le agrega agua hasta un volumen de 30 L, se adiciona NaOH en hojuelas hasta obtener un pH de 8.0 y se incorporan 1.53 ml de espumante (50 ppm). Se pone en agitación la mezcla hasta que el papel este totalmente desfibrado y la pasta este homogénea. Para mantener una temperatura de 50°C en el tanque de agitación se coloca una resistencia dentro del mismo de tal manera que este en contacto con la pulpa.



Figura 3.5 Papel desfibrado.

➤ Destintado en la columna de flotación:

Se alimenta la columna cerca de la parte superior, con la pulpa que se obtuvo en el proceso de desfibrado como se aprecia en la Figura (3.6), manteniendo un flujo constante de aire y colas en la columna, para obtener la interfase se debe de manipular la alimentación, la interfase debe permanecer estable durante 5 min en la zona de colección a manera de asegurar un sistema estable o invariable. Mediante la flotación se separa la tinta de las fibras.



Figura 3.6. Destintado en la columna.

➤ Filtrado:

Se saca la pulpa de papel destintada de la corriente de colas en la columna y se filtra en una malla. Como se observa en la figura (3.7)



Figura 3.7. Filtrado en malla.

3.4. Manejo de muestras en las corrientes.

Estando estable la interfase se procede a la toma de muestras la cual debe de llevar un orden, primero la de las colas, después la alimentación y por ultimo la del concentrado. El balance de

materia debe de cumplirse. Con las muestras de pulpa obtenidas de la corriente de colas se procede a elaborar las hojas.

3.5. Fabricación de las hojas de papel.

Equipo utilizado para la elaboración de las hojas de papel reciclado:

Cubeta de 10 L.

Jarra de 1000 ml

Desfibrador

Equipo formador de hojas

Porta discos con sus discos de acero inoxidable.

Prensa automática de hojas

Mufla (secador de hojas)

Los equipos son de la marca CREUSOT –LOIRE INSTRUMENTATION ADAMEL - IHOMARGY

Procedimiento utilizado para elaboración de las hojas

Las hojas se hacen de acuerdo a la norma TAPPI T-205-om-81 para poder realizar las pruebas físicas.

En este caso se elaboraron tres hojas de 60g/m² para cada tipo de papel usado.

Con la siguiente formula se determina la consistencia en la celulosa.

$$\%Consistencia = \frac{W_{seco}}{W_{humedo}} * 100$$

Teniendo la consistencia de la celulosa se sacan los gamos húmedos necesarios para hacer tres hojas de 60g/m².

$$W_{humedo} = \frac{(100 \times 6.462)}{\%Consistencia}$$

- Desfibrado.

Se pesan los gamos de pulpa, se colocan en el desfibrador se pone agua hasta completar 2 litros y se desfibra hasta 1000 r.p.m. Figura (3.8)



Figura 3.8. Desfibrador para hacer hojas de prueba.

Después de que la muestra ha sido desfibrada, se pasa a la cubeta y se afora a 3 litros con agua, se homogeneiza y se toma 1 litro para formar cada hoja.

- Formado de hojas

Se adiciona el litro de muestra al formador de hojas que se aprecia en la figura (3.9), se llena hasta un 40% de su capacidad con agua, se agita durante 6-8 seg. Y se procede a aplicar el vacío lentamente hasta que toda el agua haya sido vaciada y la hoja este formada.



Figura 3.9 Equipo formador de hojas.

Cuando la hoja este formada se coloca un pedazo de papel secante encima de esta, se presiona para que la hoja quede pegada en el papel, después se pasa al disco metálico dejándole la hoja secante quedando la hoja en medio del disco y la hoja secante. Así se colocan las siguientes 2 hojas.

- Prensado de las hojas.

Se pasan las hojas a la prensa que se ilustra con la figura (3.10), aplicando una presión de vacío de 4.2 psia por 2 min para que queden lisas las hojas y eliminar el agua residual.

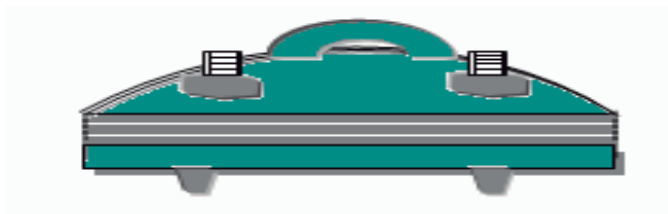


Figura 3.10. Prensa de hojas.

- Secado

Después de este tiempo de prensado se pasan al porta discos y se dejan secar en la mufla que se observa en la figura (3.11) durante 3 hrs. a 80°C aproximadamente.



Figura 3.11. Mufla secadora de hojas.

Por ultimo se sacan y se pesan las hojas en una balanza analítica debiendo tener un gamaje de 60 g/m^2 cada hoja para poder realizar las pruebas físicas.

3.6. Caracterización de las hojas de papel obtenidas.

Estas hojas son las elaboradas mediante el proceso manual antes descrito, para su tipificación se les realizaron las pruebas siguientes.

3.6.1. Realización de las pruebas físicas.

Teniendo las hojas de 60 g/cm^2 de acuerdo a la norma TAPPI T-205-om-81, se procede a efectuar las pruebas físicas siguientes: Calibre, Opacidad, Blancura, Tensión y Rasgado.

Los equipos utilizados para realizar las pruebas anteriores son de las marcas L & W Tearing Tester, Lorentzen and Wettre.

Calibre: Para medir el calibre o espesor de una hoja se utilizo un micrómetro de acuerdo a la norma TAPPI T 411. Y se mide en (μm).

Opacidad: Se determina midiendo las lecturas de reflectancia para la longitud de onda adecuada, normalmente con un espectrofotómetro. Obtenemos la propiedad de la hoja que impide el paso de la luz y evita que pueda verse a través de ella objetos cercanos o que estén en contacto con el lado opuesto utilizando el método TAPPI T 519.

Blancura: Al igual que la opacidad se mide en un espectrofotómetro. El valor práctico más importante para caracterizar el tono de una pulpa es su brillantez, la cual puede establecerse de varias maneras, utilizando algunos puntos de referencia. El valor mas utilizado es el factor de reflectancia de la luz azul (357 a 360 nm) de una hoja de pulpa, basada en la reflexión del oxido de magnesio, que se considera como 100% de blancura. De acuerdo a la norma UNIT-ISO 2470.

Tensión. Esta propiedad se determina midiendo la fuerza requerida para romper una tira angosta de papel con una longitud y anchura cuidadosamente especificadas. Y para esto se utiliza una guillotina con cuchilla de doble corte de 15 mm de ancho y un probador de tensión tipo péndulo (dinamómetro). Esta prueba es realizada de acuerdo a la norma TAPPI T 220 om-88.

Rasgado: Esta prueba se realiza de acuerdo a la norma TAPPI T 220 om-88, utilizando un péndulo, el cual ocasiona el rasgado en la muestra de hoja de pulpa o papel. Determina la fuerza promedio perpendicular al plano del papel requerida para rasgar una hoja.

3.6.2. Determinación de la viscosidad.

Se determina acuerdo a la norma.

Este método describe el procedimiento para determinar la viscosidad en solución de la celulosa al 0.5%, utilizando cuprietilendiamina 1.0 molar como solvente y un viscosímetro capilar Cannon Fenske.

La solución para la viscosidad de una pulpa, mide el gado de polimerización promedio de la celulosa. Tal como prueba, nos da una indicación relativa de la degradación que resulta de los procesos de pulpeo y blanqueo (disminución en el peso molecular).

Aparatos:

Pecera con agua con temperatura controlada (baño María)

Termómetro

Agitador magnético múltiple

Cronometro

Viscosímetro Cannon Fenske tipo capilar

Reactivos y material:

Cuprietilendiamina 1.0 M

Buretas de 25 ml

Frascos de plástico con tapa de 100 ml o matraz aforado

Seguridad:

La solución de cuprietilendiamina es sumamente cáustica y requiere mucho cuidado en su manejo. Evite el contacto de la solución con la piel e inhalación de vapores.

Procedimiento:

1. Pese aproximadamente 5 g de celulosa húmeda o 1 g de celulosa seca, desfibre en 300 ml de agua y filtre en buchner a vacío.
2. Adicione acetona para humedecer la tortilla y aplique vacío nuevamente.
3. Meta la muestra a la estufa y seque completamente a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
4. Coloque en la pecera el viscosímetro adecuado, previamente enjuagado con acetona y perfectamente seco.
5. Pese con exactitud 0.2672 g de muestra seca y colóquelos en el frasco de plástico de 100 ml.
6. Adicione con una bureta 25 ml de agua destilada y unas perlas de vidrio, y agite manualmente durante 1 minuto, luego adicione 25 ml de cuprietilendiamina y tape el frasco.
7. Coloque el frasco en el agitador magnético, ajuste la velocidad en el número 8 y el tiempo de agitación en 10 minutos.
8. Arranque el agitador para disolver la celulosa.
9. Quite la tapa y deje en reposo durante 3 minutos para eliminar el aire.

10. Pipetee exactamente 7 ml de la disolución de pulpa-cuprietilendiamina y adiciónelos al viscosímetro.

Espere 5 minutos para que la temperatura se estabilice.

11. Succione la solución con una perilla hacia la pierna de medición del viscosímetro hasta arriba de la segunda marca.

12. Con un cronometro, determine el eflujo en el que pasa la solución desde la marca superior a la inferior. Repita y promedie el tiempo de eflujo.

Registre el tiempo de eflujo en segundos.

Una inadecuada medición se debe a la disolución incompleta de la pulpa o viscosímetro sucio.

Cuando el viscosímetro presente indicios de suciedad o incrustación, lavarlo de inmediato con solución crómica.

Cálculos para la viscosidad.

Para cada una de las muestras se calcula la viscosidad con el tiempo promedio utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = C * t * D$$

Donde

μ es la viscosidad de la celulosa en Cps.

C es la constante de calibración del viscosímetro

t promedio del tiempo de eflujo, en segundos.

D es la densidad de la suspensión de pulpa.

Cálculos de la constante del viscosímetro.

Se uso la siguiente secuencia para calcular la constante de calibración del viscosímetro empleado para las muestras.

1. Tenga a la mano el aceite estándar de calibración con densidad y viscosidad conocida.
2. Mida con pipeta 7 ml de aceite con viscosidad conocida y colóquelos en el viscosímetro.
3. Mida el tiempo de eflujo por duplicado, con cronometro, de la misma forma que para la pulpa.
4. Calcule la constante.

$$C = \frac{\mu}{t * D}$$

Donde:

C es la constante de calibración del viscosímetro.

μ es la viscosidad en Cps del aceite a 25°C.

t es el tiempo de eflujo del aceite en segundos.

D es la densidad del aceite a 25°C

Para este viscosímetro la constante de calibración fue de 0.10673

3.6.3. Determinación de los tipos de fibra, longitud y diámetro.

Se disuelve una pequeña cantidad de fibra en un tubo de ensaye de 10 ml quedando una solución del 1 % en agua destilada se agita vigorosamente hasta que este totalmente desfibrado.

Se coloca una muestra en un porta objetos, después se pone a secar en una parrilla eléctrica. Se deja enfriar y se tiñe con una gota de Gaff "C" Stain se le coloca un cubre objetos y se observa en el microscopio óptico.

Diámetro y longitud de fibra: Se hacen mediciones de la longitud y diámetro de las diferentes fibras, con el uso del microscopio electrónico de barrido y se calcula el promedio de los valores para cada tipo de fibra.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. Selección de materia prima.

En el ámbito de este trabajo, la materia prima pudo obtenerse fácilmente porque la cantidad de materia utilizada fue pequeña para cada tipo de papel usado, por lo que hacer la selección y eliminar el material extraño fue algo sencillo.

4.2. Desmenuzado o triturado del papel.

El tiempo estimado para el desmenuzado de 1 kg de cada tipo de papel fue de 2 hr cortando el papel en trozos de 2x2 cm, ya que en este caso el desmenuzado fue manual. Este tiempo puede reducirse si se utiliza algún triturador

4.3. Desfibrado y mezclado del papel.

Materiales requeridos para el proceso de desintegración del papel usado, las sustancias que son adicionadas a un recipiente (pulper), y tiempo de desfibrado. Un metro cúbico de dicha pasta está conformado por un 3% a un 16% de fibras vegetales y sólidos, y el resto es agua. Este porcentaje entre fibras, sólidos y agua se denomina consistencia de la mezcla.

Tabla 4.1. Cantidades utilizadas para obtener una pulpa con consistencia de 0.8% en peso

Papel (gr)	Tiempo de desfibrado (hr)	NaOH (gr)	Espumante (ml)
247	1	1.4	1.53

En la tabla (4.1) se observa la cantidad en gramos de papel calculada para obtener una pasta con una consistencia de 0.8% en peso, así como la cantidad en gramos de NaOH necesarios para que la mezcla tenga un valor de pH de 8, se indica también el volumen de espumante requerido y el tiempo suficiente para que se llevara a cabo la separación de las fibras.

4.4. Determinación de los parámetros operativos de la columna.

La columna fue elaborada con material acrílico y tiene las siguientes características:

$$D_c = 7.5 \text{ cm}$$

$$h_c = 270 \text{ cm}$$

$$A_c = 44.178 \text{ cm}^2$$

A partir de ellos se determinaron los parámetros de operación de la columna de flotación

4.4.1. Determinación de velocidad superficial de aire (J_g óptimo)

En la tabla (4.2) se muestran los valores resultantes para la velocidad superficial del aire y el diámetro de burbuja, mismos que fueron calculados utilizando la ecuación (1) para J_g , mientras que para el Db se resuelven iterativamente las ecuaciones (4, 5 y 6) utilizando un programa computacional llamada Mi Drif Flux el cual esta soportado en Excel.

Tabla 4.2 Resultados obtenidos de Db con respecto a J_g

J_g (cm/seg)	Db utilizando 30 ppm de espumante	Db utilizando 60 ppm de espumante
0.13151	0.02153	0.01893
0.52431	0.04964	0.04310
0.72427	0.05343	0.04674
0.99102	0.06038	0.05418
1.11636	0.06030	0.05351
1.41578	0.06627	0.06052

Representación grafica de los valores de Db contra J_g .

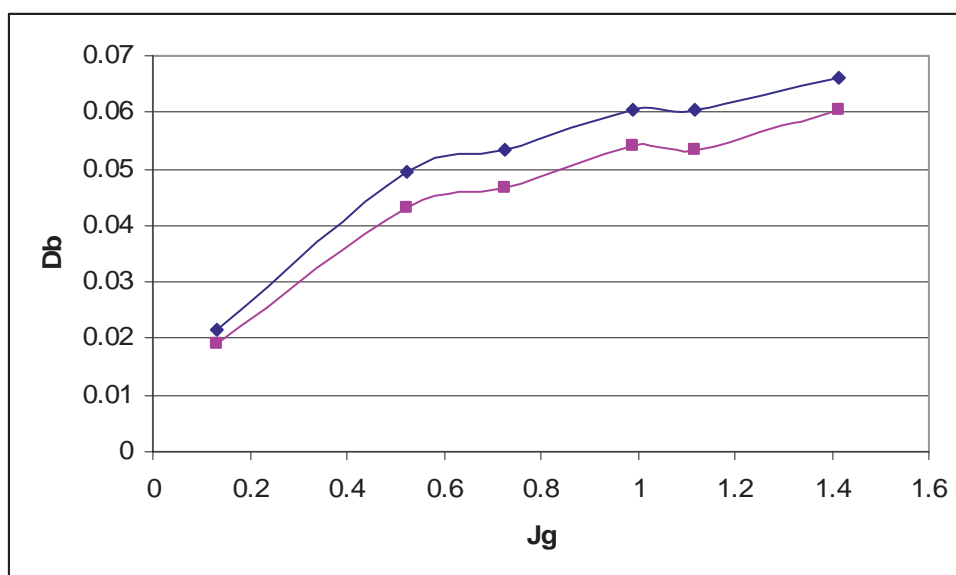


Figura 4.1 Comportamiento del diámetro de burbuja con respecto la velocidad superficial del aire.

En la figura (4.1) correspondiente a la grafica que relaciona la velocidad superficial J_g , contra el diámetro de burbuja Db , se observa un aumento repentino en el diámetro promedio de burbuja después del punto donde J_g tiene un valor de alrededor de 1, producto de la coalescencia de burbujas que provocan una perdida del área superficial de burbujas disponibles para transportar ó capturar partículas de tinta. Debido a esto, para operar la columna de flotación se toma el valor para J_g que corresponde a 0.991 para usar un área superficial mayor de burbuja.

4.4.2. Determinación de la fracción de gas (ϵ_g).

Utilizando la ecuación (13) se calcula la fracción de gas alimentada a la columna, en ambas condiciones, utilizando 30 ó 60 ppm de espumante.

Tabla 4.3. Valores de diferencia de presión tomados de dos puntos, velocidad superficial de aire y fracción de gas.

	Utilizando 30ppm de espumante		Utilizando 60ppm de espumante	
J_g (cm/seg)	ΔP	ϵ_g (%)	ΔP	ϵ_g (%)
0.13151	11.0	15.2	12.1	16.8
0.52431	19.3	26.8	22.7	31.5
0.72427	25.2	35.0	29.3	40.6
0.99102	31.0	43.0	35.0	48.6
1.11636	35.5	49.3	40.0	55.5
1.41578	41.6	57.7	45.1	62.6

Como se observa en la tabla (4.3) las fracciones de gas cuando se utilizan 30 ppm ó 60 ppm. de espumante son de 43% y 48.6% respectivamente, para el punto donde se encuentra nuestro valor óptimo de Velocidad superficial del aire J_g ; En ambos casos el porcentaje es menor del 50%, esto quiere decir que la diferencia en cada caso para completar el 100% en la columna es el contenido de pulpa de papel. Esto garantiza que en la columna no solo existe aire, sino que también esta presente la pulpa de papel que se pretende destintar.

En los valores gráficos representados en la figura (4.2) se observa que la fracción de gas contenido en la columna aumenta con respecto de la velocidad superficial del gas, por ello fue

necesario determinar el valor optimo de J_g para no tener únicamente aire en la columna ó un exceso de este, es decir que también exista pulpa presente en la columna

Representación grafica de la fracción de gas contra la velocidad superficial del aire.

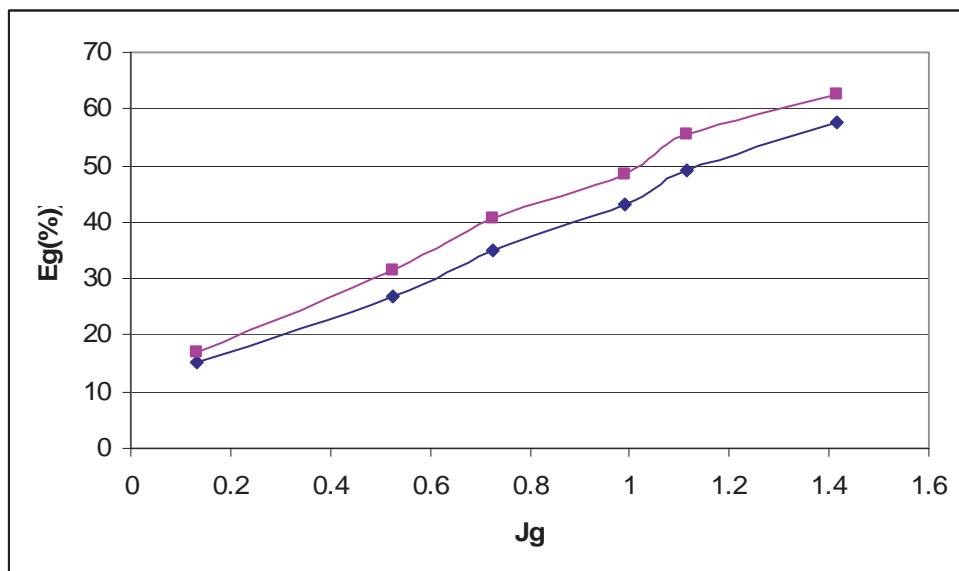


Figura 4.2 Grafica de valores de velocidad superficial de aire J_g Vs. fracción de gas ε_g

4.5. Balance de materia.

En la tabla (4.4) se muestran los valores de los flujos de las diferentes corrientes de entradas y salida de la columna que son: alimentación, colas, concentrado y agua de lavado en (g/seg).

Estos valores son de la alimentación de la pulpa de papel a la columna, la salida de pulpa de papel destintado en la corriente de colas de la columna, salida de tinta en la parte superior de la columna y entrada de agua de lavado en la parte superior de la columna. Con estos valores calcularemos el balance de materia.

Tabla 4.4. Resultados de flujos obtenidos en la columna de flotación para los diferentes tipos de papel.

	ΔP (cm)	Q_A (g/seg)	Q_C (g/seg)	Q_S (g/seg)	Q_L (g/seg)
M_1	18	19.4916	17.5	2.16	1.8
M_2	10	19.475	17.6	3.1	1.6
M_3	17	19.43	18.87	1.773	1.89
M_4	48	17.97	17.5215	1.09	1.7

Los valores resultantes de los flujos de las corrientes se expresan en cm^3/seg y se muestran en la tabla (4.5)

Tabla 4.5. Resultados de los flujos de las corrientes de la columna en (cm^3/seg)

	$Q_A(\text{cm}^3/\text{seg})$	$Q_C(\text{cm}^3/\text{seg})$	$Q_S(\text{cm}^3/\text{seg})$	$Q_L(\text{cm}^3/\text{seg})$
M₁	18.924	16.990	2.097	1.747
M₂	18.908	17.087	3.009	1.5534
M₃	18.864	18.320	1.721	1.747
M₄	17.446	17.011	1.05	1.650

Utilizando la ecuación (7) y los valores resultantes de los flujos (tabla 4.5) se realizaron los cálculos para determinar si el balance de materia se cumple, evidenciando que las entradas sean aproximadamente iguales a las salidas en las corrientes manejadas en la columna.

- Balance de materia total en la columna para los diferentes tipos de papel.

Tabla 4.6 Resultados del balance de materia total en la columna.

B.M.T	A+L = C+S	
	Entradas = Salidas	
M ₁	20.67	19.08
M ₂	20.46	20.0
M ₃	20.61	20.0
M ₄	19.09	18.01

En la tabla (4.6) donde se muestran los valores de la entrada y salida del balance de materia para los diferentes tipos de papel, comparando los valores de entradas contra salidas se observan pequeñas diferencias, que van desde el 2.24% hasta el 7.69%. Esto puede deberse a perdidas durante el proceso ó errores de medición.

- Balance por componente

Este se realiza para cada uno de los tipos de papel, y se utilizaron la ecuación (8) en el caso de balance para pulpa y la ecuación (9) para el balance del agua. Los resultados para cada tipo de papel se muestran en tablas separadamente.

Balance para el papel periódico (M1).

Tabla 4.7. Resultados de los flujos obtenidos para la fibra y el agua para M1.

M ₁					
Corriente	Q _{Total} (cm ³ /seg.)	X _{Fibra}	Q _{Fibra} (cm ³ /seg.)	X _{Agua}	Q _{Agua} (cm ³ /seg.)
A	18.924	0.008	0.1513	0.992	18.772
C	16.990	0.006	0.1019	0.994	16.888
S	2.097	0.023	0.0482	0.977	2.0550
L	1.747	0	0	1	1.747

Para la pulpa

$$0.1513 = 0.1019 + 0.0482$$

$$0.1513 = 0.1501$$

Para el agua

$$18.772 + 1.747 = 16.888 + 2.055$$

$$20.5 = 18.94$$

Para la mezcla 50% papel periódico y 50% papel de oficina (M2)

Tabla 4.8. Resultados de los flujos obtenidos para la fibra y el agua en las corrientes de la columna de flotación para M2

M ₂					
Corriente	Q _{Total} (cm ³ /seg)	X _{Fibra}	Q _{Fibra} (cm ³ /seg)	X _{Agua}	Q _{Agua} (cm ³ /seg)
A	18.908	0.0078	0.1474	0.992	18.76
C	17.087	0.0061	0.1042	0.993	16.982
S	3.009	0.0147	0.0442	0.985	2.964
L	1.55	0	0	1	1.55

Para la pulpa

$$0.1474 = 0.1042 + 0.0442$$

$$0.1474 = 0.1484$$

Para el agua

$$18.76 + 1.55 = 16.982 + 2.964$$

$$20.31 = 19.9$$

Para el papel de Oficina (M3)

Tabla 4.9. Resultados de los flujos obtenidos para la fibra y el agua en las corrientes de la columna de flotación para M3.

M ₃					
Corriente	Q _{Total} (cm ³ /seg.)	X _{Fibra}	Q _{Fibra} (cm ³ /seg.)	X _{Agua}	Q _{Agua} (cm ³ /seg.)
A	18.864	0.0069	0.1301	0.993	18.733
C	18.320	0.0048	0.0879	0.995	18.232
S	1.721	0.0277	0.0476	0.9723	1.673
L	1.747	0	0	1	1.747

Para la pulpa

$$0.1301 = 0.0879 + 0.0476$$

$$0.1301 = 0.1356$$

Para el agua

$$18.733 + 1.747 = 18.232 + 1.673$$

$$20.48 = 19.9$$

Para el papel Blanco (M4)

Para la pulpa

$$0.1133 = 0.0816 + 0.0418$$

$$0.1133 = 0.1235$$

Para el agua

$$17.332 + 1.65 = 16.929 + 1.008$$

$$18.98 = 17.93$$

Tabla 4.10. Flujos obtenidos para la fibra y el agua en las corrientes de la columna de flotación para M4.

M ₄					
Corriente	Q _{Total} (cm ³ ./seg.)	X _{Fibra}	Q _{Fibra} (cm ³ ./seg.)	X _{Agua}	Q _{Agua} (cm ³ ./seg.)
A	17.446	0.0065	0.1133	0.993	17.332
C	17.011	0.0048	0.0816	0.9952	16.929
S	1.05	0.0399	0.0418	0.9601	1.008
L	1.65	0	0	1	1.65

En la tabla 4.11 se exponen los resultados de los balances por componente para cada tipo de papel, y se observa que las diferencias en cuanto a entradas y salidas de material para la pulpa son pequeñas del 0.66% para papel del tipo M1, o bien en el caso del papel M4 la diferencia será de 09% superior en la salida con respecto a la entrada, lo cual indicara una acumulación del material a la salida, o un error de medición.

Tabla 4.11. Resultados obtenidos en el balance por componente para las 4 muestras.

	Para la pulpa		Para el agua	
	A = C + S		A + L = C + S	
M1	0.151	0.150	20.50	18.94
M2	0.147	0.148	20.31	19.9
M3	0.130	0.135	20.48	19.9
M4	0.1133	0.1235	18.98	17.93

Como se observa para cada uno de los casos entre los valores de las corrientes de entrada y salida no hay mucha diferencia esto será un indicador de que no tendremos perdidas considerables específicamente en el caso de la pulpa lo cual es prioritario para el proceso.

4.6. Recuperación del material valioso.

Utilizando la ecuación (16) y los valores obtenidos del flujo de las corrientes de alimentación y colas se calcula la recuperación.

Tabla 4.12. % de recuperación del material valioso

	$Q_A(\text{cm}^3/\text{seg})$	$Q_C(\text{cm}^3/\text{seg})$	% Recuperación
M₁	18.924	16.990	89.780
M₂	18.908	17.087	89.967
M₃	18.864	18.320	97.11
M₄	17.446	17.011	97.50

Como se observa en la tabla anterior la recuperación de los tipos de papel M3 y M4 son mayores respecto a los otros tipos de papel, lo cual representa un beneficio en la recuperación de material valioso trabajando con la columna de flotación, solo que estos tipos de papel son el de oficina y el blanco, que tienen menor cantidad de tintas, y no es un indicativo favorable para el destintado. No obstante en todos los casos la recuperación es mayor del 80%, lo cual quiere decir que es significativo para los casos del papel periódico y la mezcla M2 que contiene 50% de papel periódico.

4.7. Resultados procedentes de las pruebas físicas realizadas a las hojas elaboradas manualmente con los diferentes tipos de papel reciclado.

A manera de referencia comparativa se tomaron los valores que se obtuvieron como resultado de las pruebas físicas realizadas a las hojas elaboradas manualmente con fibra virgen (F.V.5); debido a que su preparación cumple con los requisitos de las normas ISO y TAPPI para elaborar hojas blancas, y es el patrón de referencia de la Industria donde realice estas pruebas

El peso de las hojas de acuerdo a la norma TAPPI T-205-om-81 puede estar en el rango de $\pm 5.0\%$ es decir de (2.0463 a 2,2617g) para que estas pueden tener un gramaje de 57 a 63 g/m²,

para los resultados obtenidos de peso promedio como se observa en la tabla (4:13) tenemos que las hojas elaboradas con el papel M2 que es 50% de papel periódico y 50% papel de oficina tiene un peso de 2.05 g que son las de menor peso y las hojas elaboradas con F.V.5 fibra virgen tiene un peso en gamos de 2.18, siendo este el valor mas grande en peso para los tipos de papel M2, M3 y M4, pero ligeramente menor que M1. Todos los valores para cada una de las hojas están dentro del rango permitido de peso para que se les realizara cada una de las pruebas físicas, concentrando los resultados en la tabla 4.13, resultados que se discuten uno a uno mas adelante de su representación grafica.

Tabla 4.13. Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las hojas elaboradas manualmente.

HOJA	Peso en gamos de la hoja (g)	Gramaje g/m^2 por hoja	Calibre (μm)	Opacidad (%)	Blancura (fotovolks)	Tensión (Kgf)	Rasgado (gf)
M1	2.2	61.28	232.25	96.16	46	0.65	21.1
M2	2.05	57.10	162.25	84.60	55	0.8	27.9
M3	2.12	59.005	151.5	79.61	80.7	1.2	54.5
M4	2.11	59	137	79.92	84.1	1.15	55.1
F.V.5	2.18	60.72	124.5	80.45	80.8	1.55	25.6

4.7.1. Representación grafica de los valores para las pruebas de Gamaje, Calibre, Opacidad, Blancura, Tensión y Rasgado.

Usando los resultados mostrados en la tabla (4.13.) se hará la discusión y representación grafica para cada prueba física realizada.

El gramaje del papel periódico estándar: es de $48,8 \text{ g/m}^2$ y se utiliza para satisfacer la demanda de las empresas del rubro periodístico este dato es solo para comparar con el gramaje logrado por reciclado. A continuación se muestra la imagen grafica del gramaje para los diferentes tipos de papel.

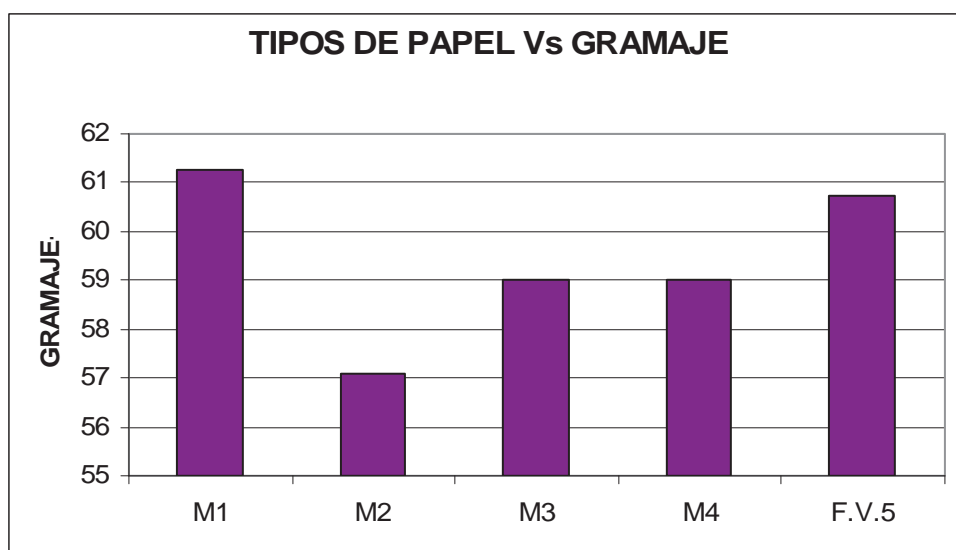


Figura 4.3. Grafica de los valores de gramaje para las hojas de papel obtenidas.

Conforme a la norma TAPPI T-205-om-81 una hoja para prueba debe pesar 60 g/m^2 , pudiendo estar en un rango de $\pm 5.0\%$ pueden tener un gramaje de 57 a 63 g/m^2 como podemos observar en la figura (4.3) todos los valores de gramaje para cada uno de los tipos de papel están dentro del rango, por lo tanto las hojas pueden ser utilizadas para las pruebas de calibre, opacidad, blancura tensión y rasgado. Dado a la importancia del gramaje si alguna de las hojas estuviera fuera de este rango seria eliminada debido a que el peso afecta todas las propiedades físicas.

A continuación se muestra la imagen grafica del espesor de cada tipo de papel elaborado.

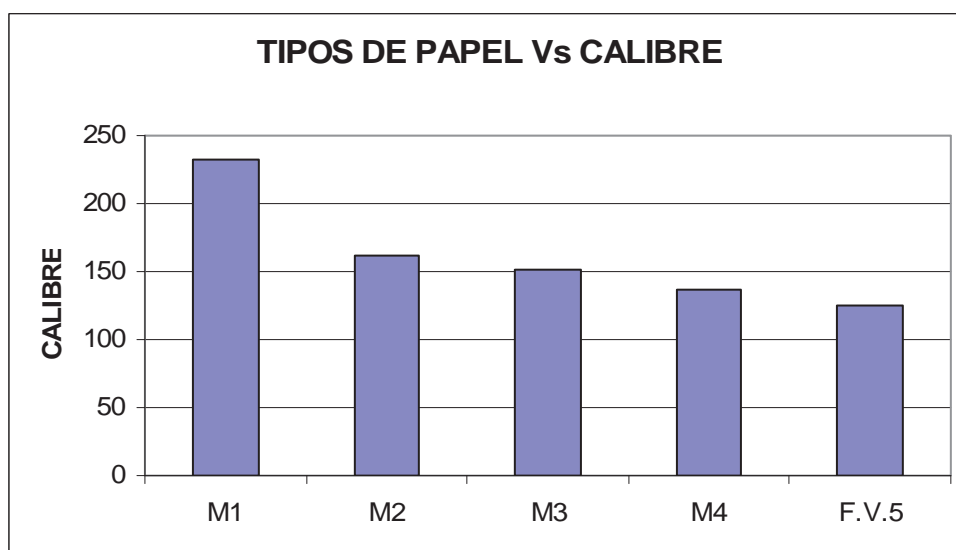


Figura 4.4. Grafica de valores de calibre para los diferentes tipos de papel.

En la figura 4.4. se observa que el valor del calibre o espesor para las hojas elaboradas con los diferentes tipos de papel va descendiendo del valor de 232 μm que es el que corresponde a las hojas elaboradas con fibras de papel periódico (M1) hasta el valor de 124.4 μm que es el correspondiente a las hojas elaboradas con fibra virgen (F.V.5) esto se debe a que la fibra utilizada para elaborar papel periódico proviene de un proceso mecánico, las fibras son cortas, se encuentran rotas y desgarradas, al formar las hojas estas tienen un mayor espesor, y la fibra virgen de un proceso químico donde las fibras son largas y al formar la hoja debido al acomodo de las fibras estas tienen un menor calibre. El calibre tiene una gran importancia en papeles para impresión, condensadores secantes, envolturas y otros usos, lo cual es congruente con los resultados debido al tipo de fibra que constituye cada tipo de papel utilizado.

A continuación se muestra la imagen grafica comparativa de la opacidad de cada una de las hojas obtenidas con los diferentes tipos de papel.

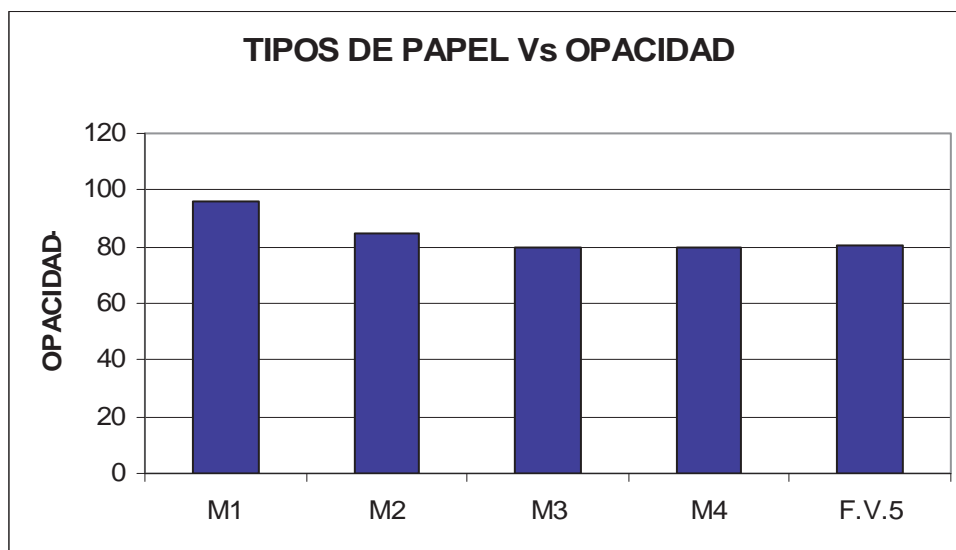


Figura 4.5. Grafica de la opacidad respecto las diferentes tipos de papel.

La opacidad es importante en el papel utilizado en impresiones debido a que es una propiedad de la hoja que impide el paso de la luz y evita que pueda verse a través de ella objetos cercanos o que estén en contacto con el lado opuesto. Como la materia prima usada es papel periódico y papel de oficina, y ambos son útiles para impresión, los valores observados para la opacidad de los diferentes papeles en la grafica (4.5) varían de 96.1%, para M1 (papel periódico) al 79.9 % para M4 (papel blanco). Comparando esos valores con la opacidad del

papel elaborado con fibra virgen que es del 80%, resulta congruente una mayor opacidad de la hoja elaborado papel periódico M1, seguido de la elaborada con la mezcla 50% papel de oficina y 50% papel periódico (M2), y valores semejantes a las hojas de fibra virgen para papel de oficina (M3) y papel de hojas blancas (M4).

A continuación se muestra la imagen grafica de la blancura para las hojas elaborada con la pulpa de los diferentes tipos de papel reciclado.

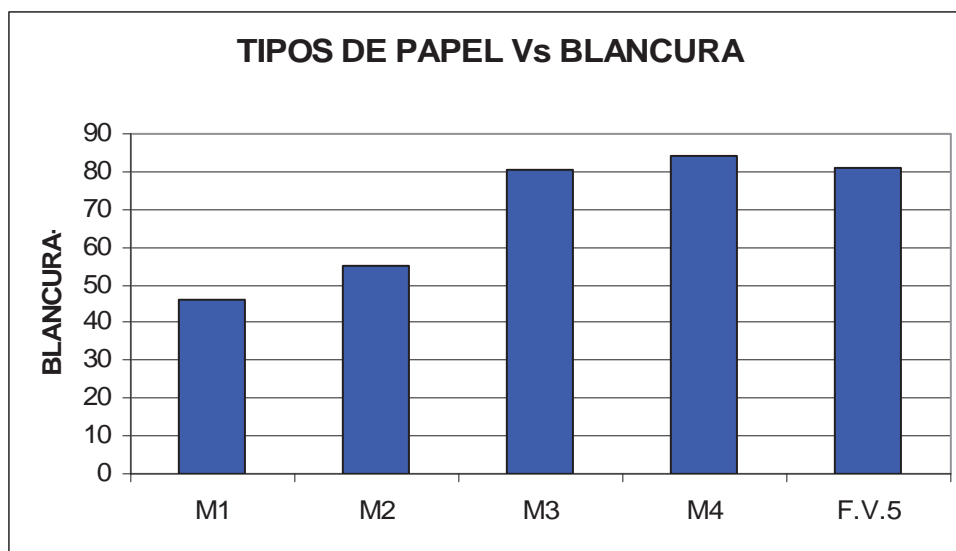


Figura 4.6. Gafica de la blancura respecto las diferentes tipos de papel.

De acuerdo a la norma ISO para la blancura esta varía del 76 al 80 % para celulosa virgen proveniente de un proceso químico y para la proveniente del proceso mecánico varia del 25 al 30 %, el valor de blancura reflejado en la figura (4.6) para las hojas elaboradas con fibra de papel periódico (M1) es 46%, para las hojas elaboradas con la mezcla de papel oficina y papel periódico (M2) se tiene una blancura del 55 %, para las hojas elaboradas con papel de oficina (M3) 80.7%, para las hojas elaboradas con papel blanco M4 el valor es de 84.8% y las hojas elaboradas con fibra virgen tienen una blancura del 80.8 %. El grado de blancura indica que en el reproceso se limpiaron un poco las fibras debido al espumante y la eliminación de los materiales de relleno del papel.

En el apéndice B se muestra una imagen donde se puede comparar la diferencia del blanco entre cada hoja. La fibra proveniente de procesos mecánicos no es posible blanquearla hasta un grado de blanco que el de las fibras provenientes de pasta química debido a que en el proceso mecánico no se elimina la lignina que le proporciona el color a las fibras.

A continuación se muestra la imagen grafica de los valores de resistencia a la tensión para cada una de las hojas elaboradas.

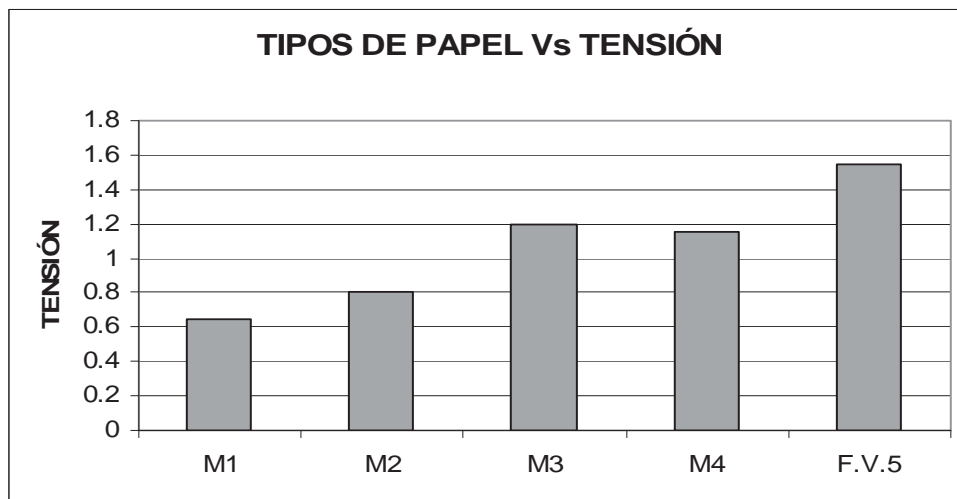


Figura 4.7. Gafica de los valores de resistencia a la tensión referidos a las diferentes tipos de papel.

Se puede observar en la figura (4.7) que el valor de la tensión para las hojas elaboradas con fibras de papel periódico (M1) es de 0.65 kgf mientras que la tensión para las hojas elaboradas con fibra virgen (F.V.5) es de 1.55f kgf, como la resistencia a la tensión es la fuerza necesaria para romper una tira de papel las hojas elaboradas con fibra mecánica requieren una menor fuerza debido al entrecruzamiento de las fibras por ser cortas cortas y son débiles por la degradación que han sufrido durante el proceso.

Enseguida se muestra la imagen grafica de los valores resultantes del rasgado para las hojas de papel.

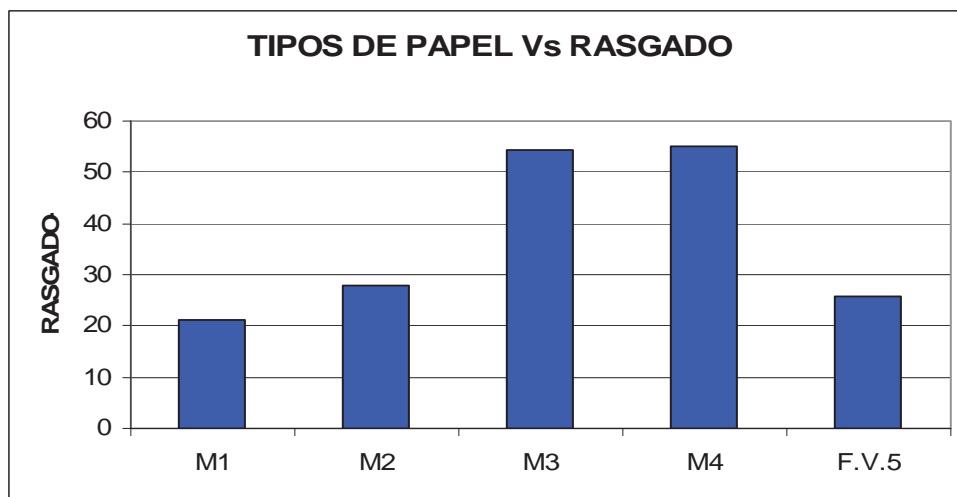


Figura 4.8. Grafica de los valores de rasgado de las diferentes tipos de papel

La resistencia al rasgado es una propiedad de la hoja relacionada directamente con la resistencia al dobléz, ya que en ambos casos la longitud de las fibras influye en el valor final de la resistencia. En la figura (4.8) podemos observar para las hojas elaboradas con fibra de papel de oficina (M3) y hojas totalmente blancas (M4) presentan un valor mayor de rasgado de 54.5 y 55.1 gf respectivamente., lo que concuerda por ser fibras largas y su origen fue una pasta química. Para las otras hojas M1, y M2 los valores están por debajo de 28 gf teniendo una menor resistencia al rasgado por que su origen es la pasta mecánica con fibras cortas en el primer caso y una mezcla de ambas pastas química y mecánica en el segundo caso.

4.7.2. Viscosidad.**Tabla 4.14. Valores de viscosidades obtenidos para las diferentes muestras.**

Viscosidad				
Tipos de papel	T1	T2	Tiempos Prom. (seg.)	Viscosidad (Cps)
M1	31	31	31	3.30863
M2	49	49	49	5.22977
M3	99	99	99	10.56627
M4	82	82	82	8.75186
F.V.5				16.4

Como se puede observar en la tabla (4.14) la viscosidad determinada para las fibras obtenidas del recicló de papel periódico (M1), y de la mezcla de papel periódico y de oficina (M2) son inferiores al de la fibra virgen (F.V.5). Acorde con las especificaciones permitidas por la norma TAPPI T-230-om-89 para la viscosidad este valor varia entre 8 y 15 cps, rango en el que se encuentran los valores de viscosidad para las hojas elaboradas con fibras de papel de oficina (M3), fibras de papel de hojas blancas (M4)y fibra virgen F.V.5. estos resultados de viscosidad, permiten calcular el peso molecular de las fibras de celulosa mediante la aplicación de la ecuación de Mark-Houwink-Sakura (18), lo que se reporta en la tabla (4.15).

4.15. Tabla de pesos moleculares calculados a partir de la ecuación de Mark-Houwink-Sakura.

	η (cps)	PM
M ₁	3.30	199150
M ₂	5.2	346753
M ₃	10.56	822653
M ₄	8.75	654088
FV.5	16.4	1407222

Los valores que reportan las referencias bibliograficas para el peso molecular de la celulosa están en los rangos de 100, 000 a 1,000, 000 unidades de d-glucosa, dependiendo del tipo de madera del que provengan. Como se observa en la tabla (4.15) los pesos moleculares para las fibras que provienen de procesos químicos es mayor que las que provienen de procesos mecánicos, ya que a mayor peso molecular corresponde un mayor tamaño de fibras.

4.7.3 Composición fibrosa de las hojas de papel.

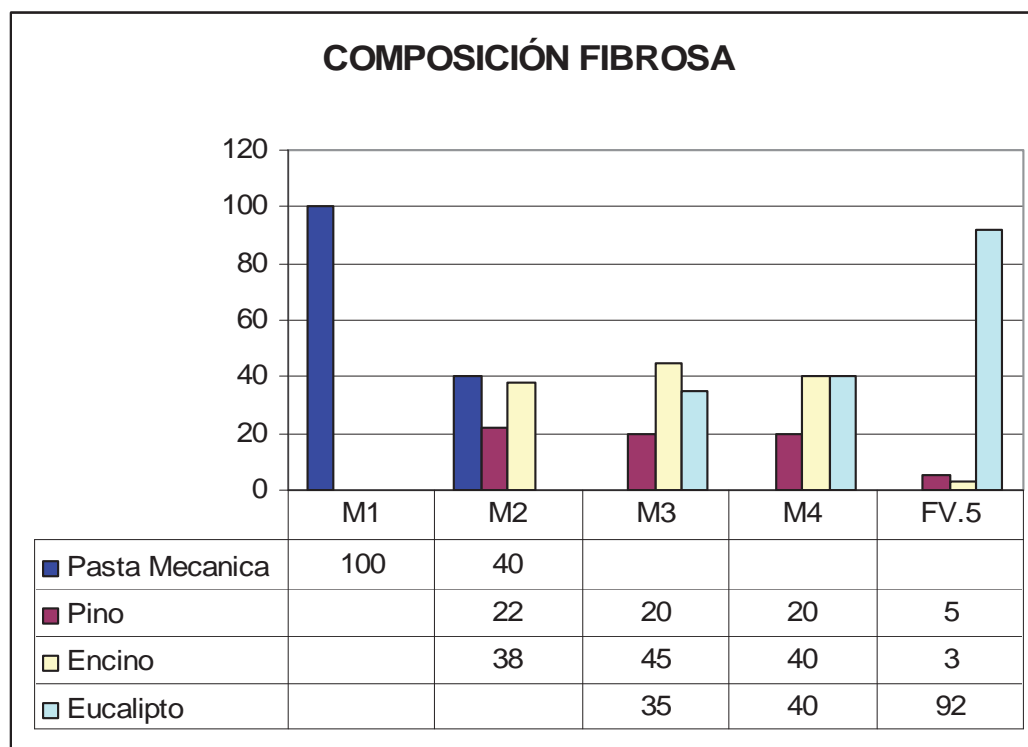


Figura 4.9. Porcentaje de fibras de diferentes especies de madera que componen las hojas de los distintos tipos de papel elaborado.

Como se observa en la figura (4.9) la pulpa de papel reciclado (M1) contiene un 100 % de pasta mecánica y puede contener fibras de diferentes especies de madera, no es posible determinar la composición por el método empleado para identificar las fibras de las especies indicadas. Utilizando el microscopio óptico y la tinción de Graff Stain se determinaron los tipos de fibras provenientes de procesos químicos para cada tipo de papel elaborado, y los resultados concuerdan, porque la variedad de las fibras reportadas para los papeles de oficina y blanco, indican que contienen fibras provenientes de madera de eucalipto, encino y pino, y corroboran ser mas largas que las reportadas en todas las pruebas para el material elaborado con hojas de papel periódico.

4.7.4. Longitud y diámetro.

Al determinar la longitud de las fibras de los diferentes tipos de papel elaborados por reciclo, mediante el microscopio electrónico de barrido se obtuvieron los valores promedio reportados en al tabla 4.16 y al ser contrastados con los valores reportados para las fibras importadas de Canadá los cuales son para el eucalipto $D = 16 \mu\text{m}$, $L = 900 \mu\text{m}$ y Pino $D = 47 \mu\text{m}$, $L = 410 \mu\text{m}$, y que sirven de patrón en la industria papelera local.

Se evidencia que los valores obtenidos para las fibras que componen los diferentes tipos de papel elaborados son de un tercio de la longitud y el diámetro una cuarta parte de las fibras vírgenes importadas, esto se debe al proceso al cual han sido sometidas las fibras (de reciclo), lo que origina la degradación en cuanto a tamaño y diámetro de las fibras, así como a su procedencia.

Tabla 4.16. Longitudes y diámetros para las diferentes fibras.

	L (μm)	D (μm)
Pasta Mecánica	170.5	4
Eucalipto	335	4.5
Pino	155	4.1
Encino	150	5

4.8. Costos.

Costos para destintar una tonelada de papel con una consistencia del 8% en peso.

Materia prima	Cantidad	Costo
Papel periódico.	1 Ton	\$224
Reactivos		
Colector-desfibrador NaOH	9.71 Kg.	\$194.33
Espumante (Aceite de pino)	6.19 Lts.	\$1238.8
Servicios Auxiliares		
Agua	121.4 M ³	\$759
Electricidad	60 KWH	\$37.02
Costo total		\$2453.15

Costos para destintar una tonelada de papel oficina.

Materia prima	Cantidad	Costo
Papel de oficina.	1 Ton	\$272
Reactivos		
Colector-desfibrador NaOH	9.71 Kg.	\$194.33
Espumante (Aceite de pino)	6.19 Lts.	\$1238.8
Servicios Auxiliares		
Agua	121.4 M ³	\$759
Electricidad	60 KWH	\$37.02
Costo total		\$2501.15

Si la recuperación promedio de la fibra de papel destintado es de 93.5 % trabajando en una columna de flotación, entonces:

1 ton X 0.935 = 0.935 Ton que seria la cantidad de fibra de papel recuperada.

Precio histórico de la celulosa (US\$ constantes s/t)

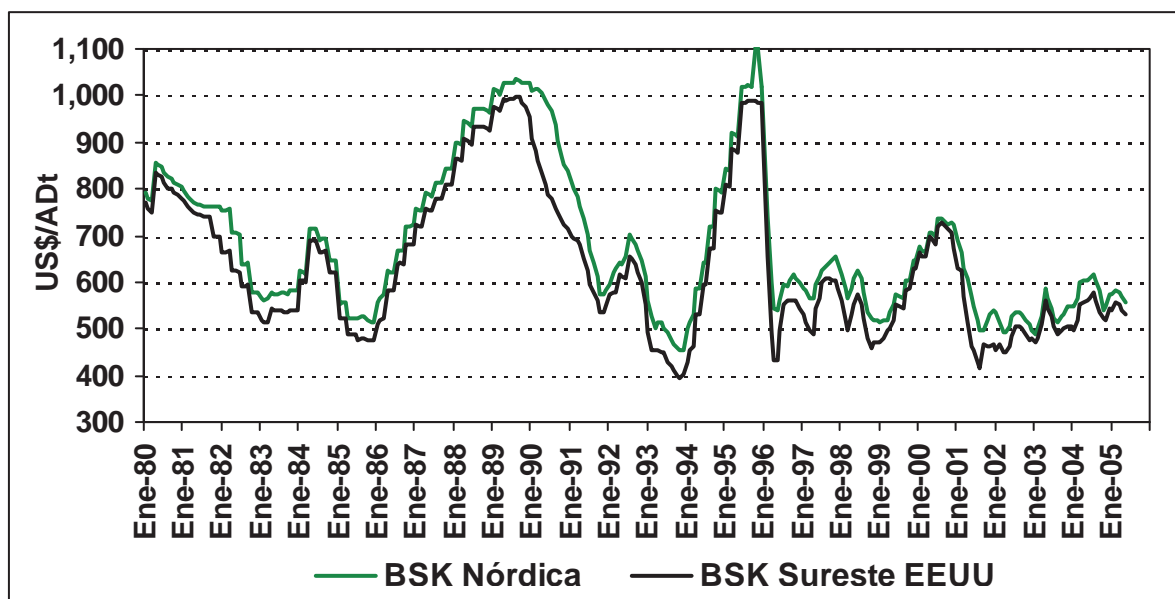


Figura 4.10. Precio histórico de la celulosa.

Nota: Precios de Lista, CIF en Norte de Europa.

Fuente: PPI, Pulp&Paper Week.

Como podemos observar en la figura (4.10) el precio de una tonelada de celulosa virgen en Enero del 2005 en el sureste de los estados unidos es de 600 dólares. En nuestro caso para producir 0.935 toneladas de celulosa de papel reciclado utilizando papel de oficina el costo es de \$ 2,501.15, la cual se puede utilizar en el proceso de elaboración de hojas blancas mezclando el 35% de pulpa de papel reciclado a la pulpa de fibra virgen. Así disminuiría el costo satisfactoriamente.

V. CONCLUSIONES

- El uso de las columnas de flotación fue una gran opción para destintar el papel periódico el de oficina y la mezcla de ambos, ya que se cumplió con los objetivos planteados para este trabajo.
- Se comprobó que la aplicación de las columnas de flotación a nivel laboratorio en comparación con otros procesos utilizados y reportados para el destintado como son de lavado y el uso de las celdas de flotación disminuyen considerablemente la cantidad de agua a emplear.
- Se puede decir que el método de destintado empleado es eficiente en la remoción de partículas de tinta pequeñas, lo cual se refleja en el grado de blanco obtenido.
- Se concluye en base a los resultados logrados que la pulpa elaborada con papel de oficina (M3) que tiene una blancura de 80.7 % ISO puede ser reutilizadas en el proceso de elaboración de hojas blancas adicionando hasta un 35% de pulpa reciclada a la pulpa de fibra virgen y aun así se obtendría un papel de buena calidad.
- Comparando las características de las fibras de pasta virgen y comparando con los valores de las pruebas realizadas a las hojas de papel elaborado con fibra virgen (F.V.5) podremos determinar el uso para estas fibras de acuerdo a sus características.
Las fibras obtenidas del papel periódico (M1) y de la mezcla de 50% de papel periódico y 50% papel de oficina (M2) que son las que tienen la característica de una mayor opacidad y calibre pueden ser utilizadas para fabricar cajas, papel periódico, laminas de cartón, etc. Debido a que en la pulpa mecánica de las fibras se encuentran rotas y desgarradas, pueden absorber rápidamente la tinta en las prensas rotativas de alta velocidad que se utilizan para imprimir periódicos, revistas y publicaciones similares.
- La pulpa y/o las hojas de papel obtenidas de los diferentes tipos de papel usados como materia prima tienen utilidad comercial en la elaboración de artesanías y manualidades, lo que se demuestra con los productos realizados para este fin.
- Los resultados de este trabajo nos inducen a motivar y crear una conciencia de reciclado en nuestro estado orientado a las personas de todas las edades, ya que contribuiremos al cuidado del ambiente, disminuyendo la cantidad de desechos sólidos.

VI. RECOMENDACIONES

1. Separar los papeles de acuerdo al tipo de tinta utilizada en la impresión y así poder definir algún tipo de reactivo a utilizar en el proceso.
2. En el momento de operar la columna para poder obtener la interfase el flujo de la corriente de alimentación debe de manipularse cuidadosamente moviendo el flujo lentamente y rango muy pequeño.
3. Al momento de elaborar las hojas tener cuidado de no tirar la pulpa, revisar que en el equipo formador de hojas no tenga alguna fugas.
4. Al momento de quitar las hojas del equipo formador cuidar que estas salgan completas.

VII. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

- ❖ Utilizar algún compuesto químico empleado en el destintado de papel en el proceso de destintado por flotación. Para poder determinar si el destintado es mas efectivo.
- ❖ Utilizar otro método para destintar y comparar la efectividad con el destintado en una columna de flotación.
- ❖ Buscar algún otro uso para las fibras de papel reciclado.
- ❖ Hacer el escalamiento y construcción para columnas de flotación en la cual se puedan manejar flujos mayores.

BIBLIOGRAFIA
Y
HEMEROGRAFIA DE INTERNET

1. **Angulo José Luís**, 1994, Caracterización Fisicoquímica de los polímeros, Limusa, México, Págs. 23, 24, 27 y 28.
2. **Carey Francis A.**, 2006, Química Orgánica, Sexta Edición, Mc Graw Hill. Pág. 1060
3. **Casey James P.**, 1990, Pulpa y Papel química y tecnología química, Vol. I, Limusa, México, Págs. 674, 686-689.
4. **Creartón**, http://www.crearton.com.mx/index.php?page_id=reciclar
5. **Daniels Alberty**, 1972, Curso de Fisicoquímica Experimental, Mc. Graw-Hill, Págs. 335 y 335.
6. **Enciclopédia Encarta**, http://mx.encarta.msn.com/encyclopedia_761557788/Papel.html
7. **Jódar Manuel**, <http://www.manueljodar.com/pua/pua3.htm>
8. **Kirk Othmer**, 1998, Enciclopedia de la Tecnología Química, Limusa. Pág. 304.
9. **Libby C. Earl**, 1974, Ciencia y tecnología sobre Pulpa y Papel., tomo I: Pulpa, Continental. Pág. 461.
10. **Pano Cuevas Rolando**, 2003, Tesis “Remoción de tinta de papel reciclado utilizando columnas de flotación”, U.M.S.N.H., F.I.Q., Morelia, Michoacán, Mexico. Págs. 12, 13, 16
11. **Papelnet.cl**, http://www.papelnet.cl/productos_papel/que_es.htm
12. **Sanjuán Dueñas Rubén**, 1997, Obtención de Pulpas y Propiedades de las Fibras para Papel, 1ª edición, Guadalajara, Jalisco, México., Págs. 32, 59, 63, 64, 89, 105, 115 y 179.
13. **Semarnat**, <http://cecadusu.semarnat.gob.mx/bibliodigital/masde100consejos/residuos.shtml>
14. **Tavera-Miranda F.J., Ph D.** septiembre del 2003, Curso de adiestramiento técnico en **operación y control en columnas de flotación**, Centro de procesamiento de dispersiones, Departamento de metalurgia extractiva; Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Págs. 9, 35, 39, 17-20, 26 y 27.
15. **Wingrove Alan S., Caret Robert L.**, 1999, Química Orgánica, Oxford, Pág. 1491

APENDICE A

Imágenes de los equipos utilizados para el destintado de papel.



Figura 1A. Tanque desfibrador



Figura 2A. Motor para agitación



Figura 3A. Domo de la columna

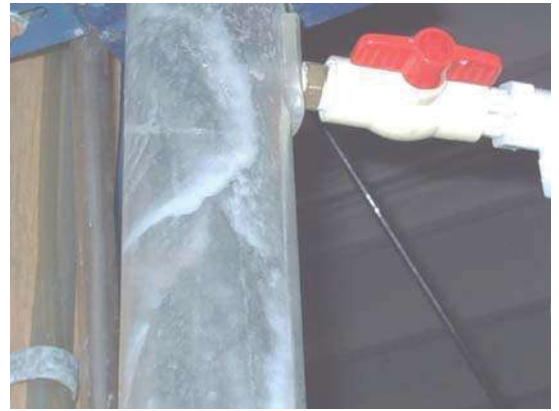


Figura 4A. Alimentación en la columna.



Figura 5A. Interfase entre la zona de lavado y colección.



Figura 6A. Flecha con aspás.



Figura 7A Columna de flotación trabajando.



Figura 8A. Columna completa y tanque desfibrador.

Apéndice B

Micrograffías tomadas en el Microscopio Electrónico de Barrido.

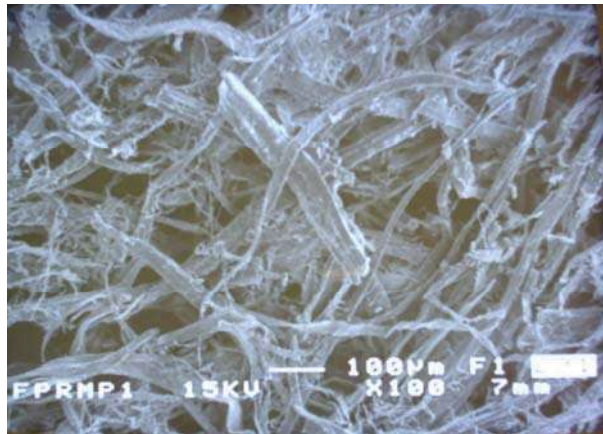


Figura 1B. Fibras de papel reciclado a 100 X

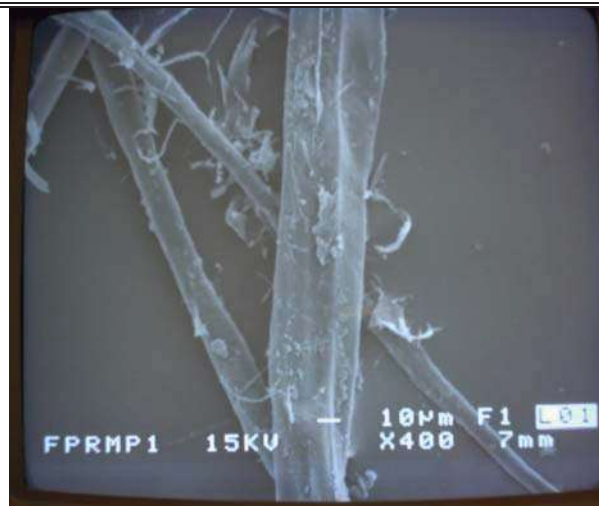


Figura 2B fibra de papel periódico a 400X

Imagen donde se observa la variación de color entre cada hoja de papel reciclado.

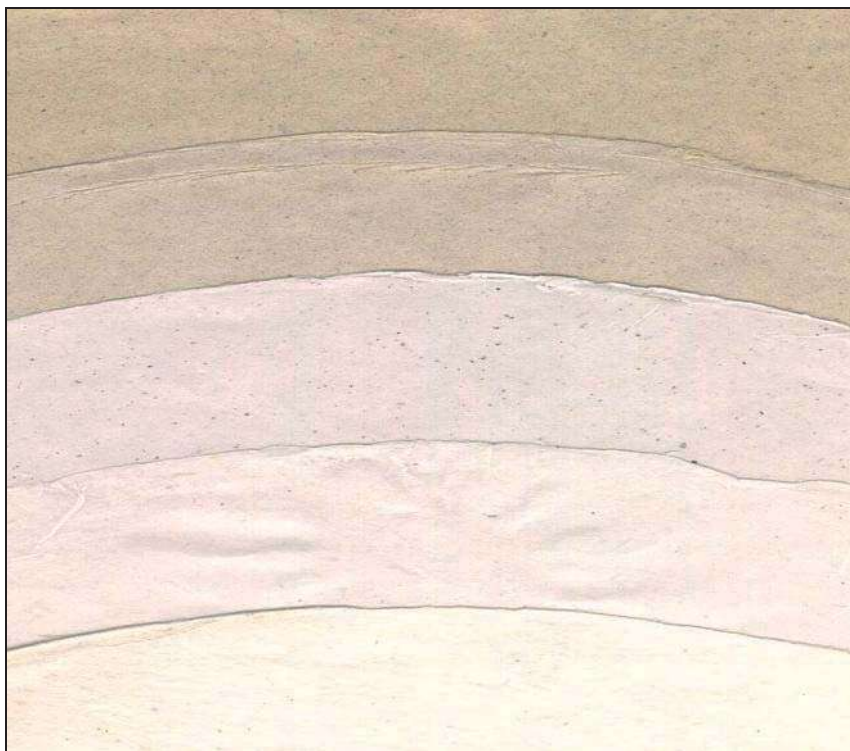


Figura 3B. Hojas de los diferentes tipos de papel reciclado.