

INTRODUCCION

Introducción

Antecedentes

La impresión a mayor volumen nace en 1430 con Johannes Gutenberg inventando la técnica de impresión de caracteres móviles o tipografía, un sistema basado en planchas con bordes sobresalientes en los cuales se empapaba con tinta para luego presionar contra ella una lámina de papel hecha de fibras de celulosa traspassando el diseño a la hoja, un formato obsoleto en nuestros días. (El padre de la imprenta. National Geographic. 2018).

Posteriormente gracias a la demanda, se desarrollaron nuevas técnicas para trabajar la celulosa químicamente para una producción industrial, obteniendo una amplia variedad de productos: papel kraf, cartulinas, papel bond, papel autoadhesivo, papel satinado, etc.

Fueron las guerras mundiales y la escasez de la materia prima, lo que generó una tendencia en la población mundial para el reciclado de materiales como: metales, papel, goma, tela, etc. (M. Arenas. 2016). Posteriormente la sobre explotación de los recursos naturales elevó la notoriedad e importancia del reciclaje para controlar la deforestación de los bosques.

Una parte importante del reciclado de papel para su reutilización posterior es la del **destintado**; un proceso que mecánicamente y químicamente separa las fibras de celulosa de la tinta que fue estampada en la superficie por medio de una técnica de impresión (digital u offset), para luego la pasta destintada ser blanqueada con más químicos y finalmente incorporarse a la cadena de elaboración de papel. Un papel para ser llamado reciclado debe tener partes iguales de fibras de celulosa virgen y celulosa reciclada para conservar una calidad similar con los papeles hechos de un 100% de celulosa virgen.

La separación de la tinta que no utilice químicos nace con la creciente concientización de la población y su petición de hallar métodos que no dejen residuos que dañen de alguna manera el medioambiente y/o deterioren la salud de las personas. El destintado por electroflotación puede ser visto como una manera de

mitigar el impacto ambiental porque solo hace uso de una celda electrolítica empleando el proceso de electrolisis para separar la tinta de la pulpa.

Objetivos

Objetivo general

Obtener una pulpa **más blanca** mediante destintado por el proceso de electroflotación al papel de copia reciclado.

Objetivos específicos

- Obtener la pulpa mediante el proceso mecánico de triturado.
- Realizar el destintado electrolítico con las condiciones óptimas de diferencia de potencial, distancia de electrodos y tiempo de proceso.
- Realizar las pruebas preliminares para obtener la curva de absorción y curva de calibración.
- Determinar la influencia de los factores (tiempo y voltaje) en el proceso de destintado de pulpa de papel.
- Obtener la eficiencia de una celda electrolítica para destintar pulpa de papel.

Justificación

Teniendo en cuenta que el valor de las exportaciones de pulpa de papel reciclado ha crecido a nivel mundial un 33.1% desde 2017 a 2018 siendo un poco más de mil millones de dólares americanos (observatory of economic complexity.2018) un crecimiento muy importante porque el espacio que ocupa en el mercado en comparación a los productos hechos de fibras vírgenes es muy reducido.

En Bolivia el consumo de papel como producto de uso cotidiano crece a pasos acelerados incluso si en el país no se cuenta con ninguna industria papelera que use como materia prima celulosa de bosques, solo se cuentan con empresas que reciclan papel. Además, que Bolivia tiene una demanda de papel reciclado porque importa más de dieciséis mil toneladas en el año 2021 según la tabla 1.

Tabla 1**Toneladas importadas de pulpa de papel reciclado 2017-2021**

Exportadores	2017	2018	2019	2020	2021
	Cantidad importada, Toneladas				
Mundo	11.215	9.866	7.779	10.681	16.581
Estados Unidos de América	6.715	4.422	1.470	3.704	11.628
Brasil	3.918	4.911	4.377	3.662	3.169
Uruguay			50		632
Chile		16		91	552
Argentina	365	240	486	295	363
Perú			986	2.731	163
Israel					49
Paraguay	217	28	307		26
Canadá		251			
China	1				
Alemania			0		
Corea, República de				96	
España				101	
Suecia		0			
Suiza			103		

Fuente: Trade Map - Lista de los mercados proveedores para un producto importado por Bolivia, Estado Plurinacional de Bolivia.

La Tabla 2 muestra la producción de productos de papel reciclado en su mayoría papel sin impresión (retazos de imprentas) elaboradas por las dos principales empresas de elaboración de papel: Papelbol y La Papelera S.A.

El proyecto propone la utilización de la pulpa destinada por electroflotación para su uso en el proceso de producción de papel, brindando datos científicos que podrían ser utilizados por empresas a futuro que ya reciclan papel para producir papel kraf; ofreciendo esta alternativa como un método ambientalmente amigable, igualando en la eficiencia a los métodos y a una reducción de costos a la hora de reutilizar papel bond impreso.

Tabla 2
Adquisición de materia prima para la producción del año 2020

Detalle	Cantidad (toneladas)
Papel blanco de primera enfardado	292
Papel blanco de segunda enfardado	656
Archivo mixto enfardado	438
Cartón DKL	1.151
Cartón común	500
Total	3037

Fuente: SEDEM. 2020.

Capítulo I
MARCO TEÓRICO

Aspectos técnicos

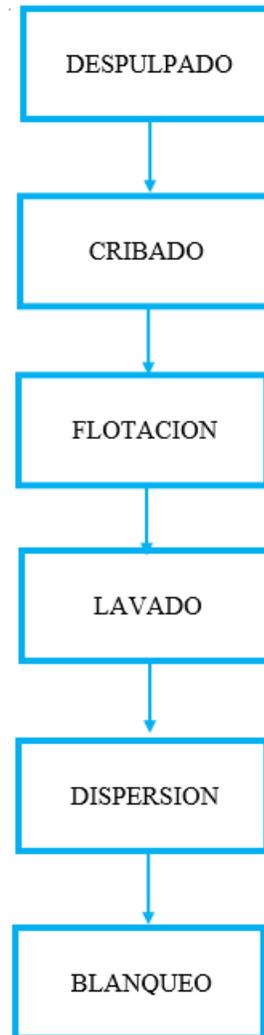
1.1. Elaboración del papel

La pulpa virgen y la pulpa reciclada son dos tipos de pulpas que se elaboran para fabricar papel. Producido separando química o mecánicamente fibras de celulosa de maderas o cultivos de fibras. El papel virgen es el tipo de papel que no contiene ningún contenido reciclado y se fabrica directamente a partir de pulpa de árboles o algodón. Este tipo de papel también se considera papel de alta calidad. (Savi, A. 2022).

El proceso comienza con la recepción de fardos de corteza que luego es troceada en astillas, estas astillas pasan a la etapa de cocción que tiene el trabajo de disolver la lignina, después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que es la única fibra no polisacárido que se conoce, se encuentra en la naturaleza, pero se concentra más en la corteza de los árboles.

El papel no se puede reciclar indefinidamente. Con cada reciclaje, las fibras se vuelven más cortas. Después de ser procesadas de cinco a siete veces, las fibras se vuelven demasiado cortas para la producción de papel nuevo, lo que requiere la adición de fibras nuevas. (Rick Leblanc. 2018).

Figura 1-1
Fabricación de pulpa de papel usado



Fuente elaboración propia (2023).

Despulpado

El despulpado disocia las fibras entrelazadas en una sola fibra y mantiene el estado y resistencia de las fibras.

Este proceso se ve afectado por: la temperatura, el tiempo, la concentración, la clasificación del papel, etc. El despulpador hidráulico y el despulpador de papel

cilíndrico son los más comunes para la fabricación de pulpa de papel, los hay verticales y horizontales, continuos y por lotes. (CNBM internacional. 2023).

Cribado y Limpieza

Las astillas cocidas pasan al difusor, en donde se lavan en varias etapas y al mismo tiempo se mezclan las fibras. Los residuos de productos químicos, material orgánico y residuos se clasifican y espesan, la pulpa cruda resultante se almacena en tanques. Algunos procesos industriales han incorporado un paso previo al blanqueo, que consiste en una etapa de deslignificación con oxígeno trabajando a 90 °C.

Flotación

Se aplica principalmente a la producción de pulpa destintada, debido a que la mayor parte de la tinta son materiales en base orgánica, las partículas de tinta tienen propiedades hidrofóbicas, utilice tensoactivos para recoger las partículas de tinta y elevarla por encima de la pulpa, el tanque de flotación es el equipo principal del destintado del papel reciclado.

Lavado

El proceso de lavado de pulpa utiliza agua o diluyente para disolver una sustancia no fibrosa y soluble en el proceso de cocción de la pulpa, mientras se separan las fibras y finalmente se obtiene la pulpa limpia. Los equipos más comunes son: lavadoras de tambor por vacío, prensas doble rodillo, prensas de un solo tornillo, filtros de disco, etc. (CNBM internacional. 2023).

Blanqueo de la pulpa

El blanqueo ofrece a la pulpa sus características fisicoquímicas; capacidad de drenaje, resistencia en húmedo, resistencia estructural, capacidad de enlace entre fibras, y especialmente la cualidad de la blancura. El blanqueo se realiza en varias etapas sucesivas utilizando diferentes químicos en cada una de ellas, como se muestra en la Tabla I-1.

Tabla I-1

Químicos usados en las etapas del blanqueo de la pulpa de papel

Químico usado en el proceso	Designación abreviada	Descripción
Dióxido de cloro	D	Oxida y extrae la lignina sus derivados, la principal diferencia con el cloro es que no genera componentes organoclorados tóxicos.
Hidróxido de sodio	E	Solubiliza los derivados oxidados de la lignina, es usado en la etapa de extracción, acompañado del oxígeno para extraer la lignina.
Peróxido de hidrogeno	P	Es un estabilizador de la blancura, se usa acompañado del peróxido
oxigeno	O	Actúa como oxidante de la lignina, trabaja a altas presiones y en medio alcalino.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Secado de la pulpa

La máquina secadora tiene un número de componentes con diferentes opciones; el cajón de entrada en donde la pulpa se deposita sobre una tela movimiento formando una lámina continua y además drena el agua, sección de prensas remueve el agua excedente mediante el prensado de la hoja y al mismo tiempo modifica su estructura, el secado de aire que hace uso de radiadores de vapor para calentar el aire eliminando el agua remanente.

Prensado y embalado

Donde la lámina de papel es cortada y embalada en fardos que pueden llegar a pesar 20 toneladas.

1.2. Destintado de la pulpa

El destintado es el proceso de separar la tinta estampada en la superficie de celulosa por cualquier método de impresión en una gran variedad de papeles, la Tabla I-2 muestra las excepciones del tipo de papel reciclado a destintar que por la razón de un mayor procesamiento de la pulpa elevarían demasiado los costos.

Tabla I-2

Papel no recomendado para el destintado

Variedad de papel
Papel vegetal (papel cebolla)
Papel carbónico
Papel sanitario usado
Papel y cartón recubierto de sustancias impermeables
Papel sucio, engrasado o contaminado

Elaboración propia. (2022).

El destintado surge cuando se quiere reciclar el papel que ya fue impreso anteriormente en al menos una de sus caras, se añade como un proceso secundario en un circuito aparte acoplado antes de la etapa de blanqueado en el proceso de elaboración de papel de celulosa. Cabe añadir que el papel reciclado ya fue separado de la lignina por lo que se omite esa etapa.

Lo primero antes de cualquier proceso de destintado, sería el acondicionamiento del papel reciclado, en esta etapa se desintegra el papel mediante agitación mecánica en un ambiente acuoso por el equipo llamado Pulpero, el resultado es una suspensión de fibras hinchadas con las fuerzas de enlace entre la tinta y el soporte debilitadas, dejándola preparada para su destintado.

1.3. Uso y aplicaciones de la pulpa

Se puede usar como pasta mecánica, una materia que por su bajo costo se reutiliza en la producción de papel de periódico.

Mesclado con otras pulpas de celulosa virgen se puede elaborar papel de escritura y para impresión.

Mesclado con hidróxido de sodio y sulfato de sodio durante la cocción se obtiene el papel Kraft, un tipo de papel de color marrón usado en envases y bolsas tiene la característica de ser un papel robusto y resistente a los desgarros. También es usado para elaborar papel de regalo en general y si se blanquea pueden ser usado como papel de escritura o papel offset.

1.4. Tipos de destintado

Destintado alcalino

Permite la eliminación de tintas, en condiciones alcalinas (pH del medio cercano a 11), se favorece la desintegración del papel y los posibles contaminantes como agentes de encolado y ligantes, mientras que los pigmentos de la tinta y componentes del vehículo se dispersan y se saponifican en algunos casos.

Los resultados más satisfactorios se presentan cuando se utilizan inicialmente una etapa de pulpeo y flotación en condiciones neutras y una segunda etapa de pulpeo (ayudado por el blanqueo del peróxido de hidrógeno) y flotación en condiciones alcalinas. En la Tabla I-3 se puede ver los compuestos usados el destintado alcalino.

Tabla I-3

Sustancias químicas usadas en el destintado alcalino

Químico usado en el proceso	Descripción
Hidróxido de sodio	Se usa para regula el pH, saponificar las resinas de la tinta, recomienda usar un pH de 9-11
Peróxido de hidrogeno	Es un agente de blanqueo
Silicato de sodio	Opera como el estabilizador del peróxido
surfactantes	La parte hidrófoba del surfactante se asocia a la tinta mientras que la parte hidrófila la mantiene suspendida en el agua

Fuente: Revista investigaciones aplicadas. (2012).

Destintado enzimático

El destintado enzimático es el proceso que se efectúa utilizando enzimas, las cuales pueden atacar el papel o en algunos casos las partículas de tinta. Para el destintado enzimático, las más comunes son las celulasas, las cuales degradan la celulosa liberando las partículas de tinta que están aferradas al papel, y posteriormente puedan ser removidas, dando como resultado un papel con cantidades menores de tinta. Estas enzimas pueden ser ayudadas en algunos casos por los surfactantes.

En la Tabla I-4 observamos las enzimas que se usan en el destintado alcalino.

Tabla I-4

Enzimas usadas en el destintado enzimático

Enzima	Trabajo
Lipasa y esterasa	Degradan las tintas basadas en aceites vegetales
Pectinasa, hemicelulasa y enzimas lignolíticas	Alteran la superficie de la fibra
Celulasa	Mejora el destintado de fibras secundarias
proteasas	Evita la acumulación de biofilms (acumulación de bacterias patógenas)

Fuente: Revista investigaciones aplicadas. (2012).

Destintado neutro

Un destintado neutro se refiere a un destintado que se realiza en un ambiente con un pH cercano a 7, es equivalente al destintado tradicional, sus principales variaciones se pueden apreciar en los tipos de reactivos utilizados y en las condiciones de operación. Una de las variaciones apreciables en los reactivos, aunque no siempre se usa, es la incorporación de sulfito de sodio como reemplazo del hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno.

Es apropiado para el destintado neutro utilizar una concentración de 200 mg/L, ya que en concentraciones superiores a 500 mg/L pueden disminuir la eficiencia de la flotación.

1.5. La Tinta

El latín **tinctoria** (“teñir”), la tinta es el líquido coloreado que se utiliza para escribir o dibujar a través de un instrumento adecuado. Este líquido suele contener distintos pigmentos que permiten colorear una superficie con la intención de crear textos o imágenes.

Los distintos tipos de tinta presentan notorias diferencias entre sí. Los historiadores creen que las primeras tintas fueron creadas alrededor del año 400 a.C. con goma y hollín. Esta tinta era utilizada con plumas o pinceles para escribir. Otra tinta antigua era elaborada a partir de moluscos.

La tinta china, por otra parte, es producida mediante el carbón vegetal molido, apelmazado y compactado con resinas vegetales u otras sustancias que puedan actuar como pegamento.

En el caso de las impresoras de inyección, la tinta se incluye en un cartucho. Es habitual que estos equipos incluyan un cartucho para el color negro y otro con magenta, amarillo y cian, que según sus proporciones permiten crear distintos tipos de colores.

Composición de la tinta

Pigmentos. (15%) Es el elemento que le da color.

Vehículo. (75%) Es el elemento que transporta el pigmento, y da las propiedades de secado de la tinta, conformado por resinas y aceites.

Aditivos. (10%) Secantes: manganeso, cobalto y zirconio.

Principales características de las tintas

En la Tabla I-5 se observan las características de la tinta.

Tabla I-5
Propiedades de la tinta

Categoría	Sub Categoría
Colorimetría	Tono, intensidad, brillo
Reología	Tack o pegajosidad, viscosidad, rigidez, tixotropía, emulsionabilidad y secado
Molienda	Tamaño de los pigmentos

Fuente: Graficas Azorín (2012).

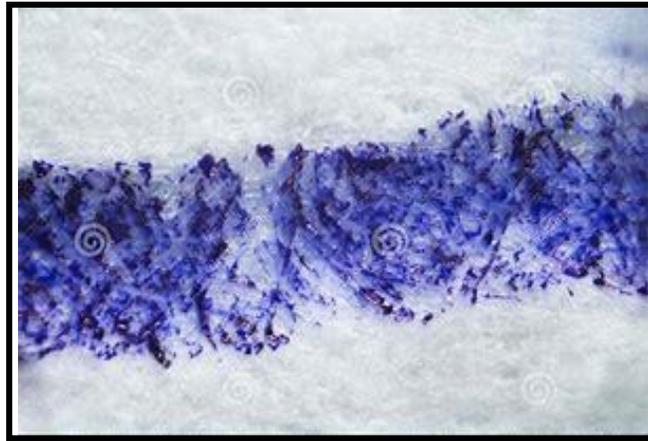
1.6. Impresión de papel

La impresión en papel es una de las formas más antiguas de copia un texto o una imagen de forma masiva, tiene la característica de ser un método rápido y generalmente barato y accesible.

Impresión digital

Es la impresión directa de un archivo digital a papel u otros materiales por medio de impresoras, siendo las más comunes las impresoras de inyección de tinta líquida y las impresoras láser. La manera de verificar la calidad de la impresión es examinar los puntos por pulgada (PPP) de tinta que la impresora recubre sobre la superficie del papel. En la figura 1-1 se observa tinta impresa en las fibras del papel.

Inyección de tinta. Es la impresión directa de un archivo digital a papel u otros materiales por medio de impresoras, siendo las más comunes las impresoras de inyección de tinta líquida y las impresoras láser.

Figura 1-1**Impresión digital en papel con zoom**

Fuente: imagen de stock (2022).

Impresión láser. La impresora láser basa su funcionamiento en la electricidad estática y consiste en un haz de luz láser que graba la dirección, forma e intensidad de la imagen a imprimir en el cilindro fotoconductor, estos puntos permanecen ionizados y pasarán por el depósito de tóner donde la tinta en polvo será atraída a esos puntos para luego ser transferidos al papel y por medio de un sistema de presión y calor adherirse formando una impresión de calidad en unos pocos segundos.

Impresión offset

El offset es un sistema de impresión indirecto puesto que la imagen no pasa de la plancha al papel o plástico directamente, sino que pasa de la plancha a un caucho y del caucho al soporte final. Gracias a la flexibilidad del caucho o silicona, la tinta es capaz impregnar superficies con texturas irregulares, ofreciendo una mayor calidad.

La plancha es un soporte plano de aleación metálica, son monocromáticas, solo pueden transferir un color por lo que la imagen requiere de ser tratada antes de ser transferida a la plancha. Se ha descomponer según el modelo de color CMYK (Cian, Magenta, Yellow, black), puesto que con la combinación de dichos colores contando con el blanco del papel se pueden obtener todos los tonos de todos los colores, por tanto, para imprimir una imagen a color se necesitan 4 planchas.

Este tipo de impresión tiene muchas ventajas como la calidad de la impresión, a diferencia de la impresión digital puede imprimir sobre todo tipo de papeles, es económica cuando hablamos de tiradas grandes y permite controlar los colores exactos y usar tintas especiales como el oro y plata, aplicar barnices, etc.

1.7. Electroflotación

Este proceso de destintado de papel hace uso de la electrolisis del agua en una cuba electrolítica para separar la tinta de la pulpa de papel reciclado. El mecanismo está basado en la electroflotación, que hace uso de pequeñas burbujas de hidrógeno resultantes de la electrolisis del agua en presencia de NaCl o NaOH, estas burbujas se adhieren a la superficie de las partículas de tinta y las arrastran a la parte superior generando una materia suspendida en el agua, se recomienda priorizar la cantidad de burbujas generadas que el tamaño de las mismas para elevar lo que se llama superficie específica.

La distribución del tamaño de las burbujas de gas fue un factor importante en los sistemas de electroflotación porque las burbujas pequeñas aumentaban la eficiencia de la flotación de las partículas. Cuando se aplicó bajo voltaje (11 V), el tamaño promedio de la burbuja de gas se formó entre 0,01 y 0,09 mm² tanto en la superficie del cátodo como en la del ánodo. (Conferencia internacional IEEE 2021 sobre salud, instrumentación y medición, y ciencias naturales. 2021).

Tabla I-6

Semireacciones de la electrolisis del agua

Electrodos	Reacción Redox	Semirreacción
Ánodo	oxidación	$2 \text{H}_2\text{O}_{(\text{liq})} \rightarrow \text{O}_2 (\text{g}) + 4 \text{H}^+ (\text{acu}) + 4\text{e}^-$
Cátodo	reducción	$2 \text{H}_2\text{O}_{(\text{liq})} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + 2 \text{OH}^- (\text{acu})$

Fuente: Elaboración propia (2022)

Electrolisis del agua con NaCl

La electrolisis del agua con NaCl tiene dos semirreacciones que generan cloro e hidrogeno gaseoso, como se muestra en la Tabla I-6.

Tabla I-6

Semirreacciones de la electrolisis del agua en presencia de NaCl

Electrodos	Reacción Redox	Semirreacción	Observaciones
Ánodo	oxidación	$2 \text{Cl}^{-2} \rightarrow \text{Cl}_2 (\text{g}) + 2\text{e}^{-}$	No se produce oxigeno gaseoso en esta electrolisis
Cátodo	reducción	$2\text{e}^{-} + 2 \text{H}^{+} \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$	El OH^{-} se combina con el Na^{+} formando NaOH

Fuente: Elaboración propia (2022).

El agua que acompaña a la pulpa del papel no tiene la capacidad de conducir electricidad por lo que se necesita añadir una sal para formar una solución conductora, es suficiente con añadir de 2-3 gramos de NaCl por cada litro de agua para lograr una buena conductividad en la solución.

Nota: Para encontrar la cantidad de NaCl necesaria para el experimento se elabora la cuba electrolítica conecta, se coloca el voltaje necesario añadiendo con una espátula el NaCl de gramo en gramo hasta que se observen burbujas provenientes del electrolisis del agua.

Se pueden usar electrodos inertes de carbono o de platino (el platino conduce mejor la electricidad, pero tiene un elevado precio), usar electrodos rectangulares funcionaran mejor que unos electrodos cilíndricos porque una mayor superficie del electrodo ayudara a producir más burbujas.

Se forma una pequeña cantidad de NaOH en la solución que elevara gradualmente el pH (inicialmente neutro por la disociación completa del NaCl).

1.8. Análisis espectrofotométrico

Para conocer el rendimiento del destintado electrolítico se usará el espectrofotómetro para comparar las concentraciones halladas de tinta al inicio y al final del proceso.

La espectrofotometría UV-visible es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución, se basa en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal de la concentración, para hacer este tipo de medidas se emplea un espectrofotómetro, en el que se puede seleccionar la longitud de onda de la luz que pasa por una solución y medir la cantidad de luz absorbida por la misma. La curva espectral resultante es diferente para cada compuesto analizado.

Pasos a seguir

1. Entrar en el menú de longitud de onda (λ)
2. Seleccionar la longitud de onda deseada (λ)
3. Introducir la celda que contiene el blanco (agua o reactivo)
4. Verificar los valores en la pantalla

Ley de Lambert-Beer

Esta ley nos permite relacionar la absorbancia de una solución con su concentración.

$$A = \epsilon \cdot l \cdot c$$

A es la absorbancia, ϵ es el coeficiente de extinción molar, **l** es la longitud de la cubeta que se introduce en el espectrofotómetro para su medición y la **c** es la concentración de la solución medida. El coeficiente de concentración molar es una constante característica para cada compuesto por ese motivo se puede realizar una curva de calibración para estandarizar la posterior medición del mismo.

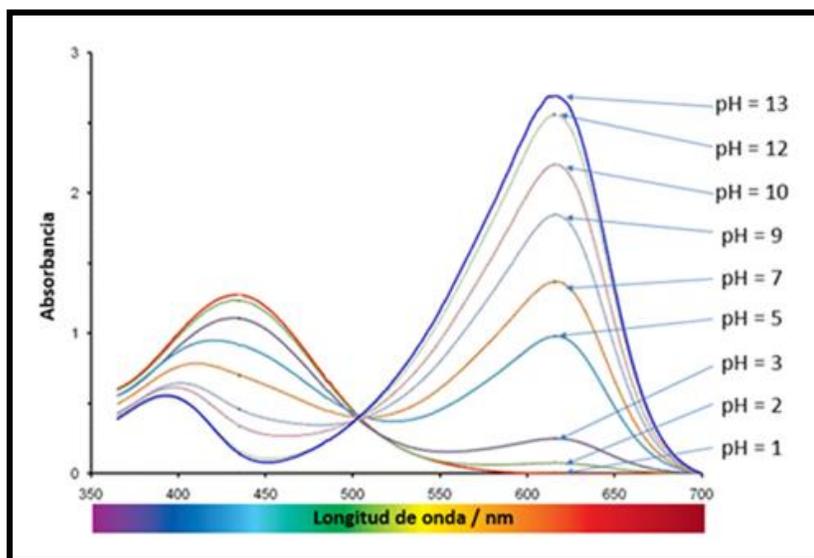
Barrido espectrofotométrico

Llamada también **curva de absorción**, se realiza para conocer en que rango de longitud de onda se obtiene la absorbancia máxima para un determinado compuesto, existen equipos con un software que nos permite de realizar esta comparación de las

diferentes longitudes de onda frente a la absorbancia para un mismo compuesto a diferente concentración como se muestra en la Figura 1-2.

Para el método manual se selecciona una solución de concentración conocida, y se lee la absorbancia a **distintas longitudes de onda** en un intervalo que puede ser 10 nanómetros por medición, se debe tener otra cubeta con agua para ajustar la medida luego de cada cambio de en la longitud de onda, finalmente se construye una gráfica colocando las absorbancias en el eje Y, y el intervalo de longitudes de onda en el eje X, analizando la gráfica se observa en que longitud de onda el compuesto absorbe más radiación (λ máx.).

Figura 1-2
Espectro de absorción a diferentes pH (ejemplo)



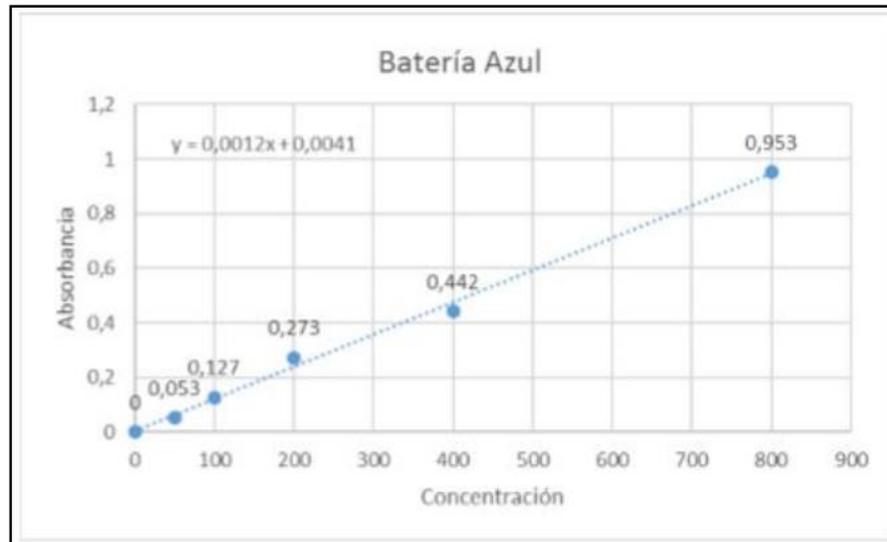
Fuente: Espectrofotometría UV, aplicaciones químicas. JMGAV. (2012).

Curva de calibración

Para obtener una curva de calibrado de un compuesto se preparan soluciones de diferentes concentraciones del mismo midiéndolas en **una sola longitud de onda**, determinándose para cada una de ellas el valor de absorbancia. Estos valores de absorbancia se representan en el eje de abscisas (eje de x) y los de concentración en el eje de ordenadas (eje de y) como se observa en la Figura 1-3.

Figura 1-3

Elaboración de la curva de calibración



Fuente: Construcción de una curva de calibración y manejo del espectrofotómetro. (2016).

Se utiliza la fórmula de **regresión lineal**:

$$y = a + bx$$

- **y** = dato de la absorbancia
- **a** = punto de inserción
- **b** = pendiente
- la **x** se despeja para determinar la concentración desconocida

Se observará que, a bajas concentraciones, el aumento de concentración se corresponde con un incremento lineal en la absorbancia (zona de cumplimiento de la ley de Lambert-Beer). A concentraciones altas la linealidad se pierde y se observa que la línea se aplana, por lo que las medidas son poco fiables.

La representación de Lambert-Beer, $A = \epsilon \cdot c \cdot l$, nos permitirá calcular el valor del coeficiente de extinción molar, que corresponde a la pendiente de la recta.

Capítulo II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Descripción y análisis de la materia prima

La materia prima utilizada en el presente proyecto de investigación es el papel bond, tamaño carta (216 mm x 279 mm), con un gramaje de 75 gr/m², impreso en una cara de la hoja con 30 filas con la letra “A” repetidamente de manera que cubran la mayoría del papel, fuente: Times New Roman; tamaño de fuente: 12; negrita: No; interlineado: 1.5; márgenes: 3 cm.

Impresas por una cara por el programa Microsoft Word 2020, realizado digitalmente mediante impresión con tinta líquida. La impresora usada es de la marca: Canon, modelo: Imageclass P622, impresión a color y en negro.

Según la Tabla II-1 la materia prima se registraría como un papel de media calidad altamente distribuido y consumido por ser el más económico para realizar todo tipo de impresiones digitales.

Tabla II-1

Tipos de papel y su gramaje

Gramaje (gr/m²)	Usos	Gramaje (gr/m²)	Usos
42	Papel periódico	175	Fotografía
60	Papel estándar	250	Portadas
75	Papel medio	90-150	Dibujo
90	Papel alta calidad	300-600	Acuarela

Fuente: Toshiba. Gramaje adecuado para impresión láser. (2017.)

2.2. Selección del método de experimental para el destintado de papel con impresión

Para seleccionar el método a efectuar, previamente se toman en cuenta los métodos más conocidos y que pueden ser aplicados a la pulpa de papel para separarlo de la tinta impresa, los métodos son:

- Destintado usando como electrolito el NaCl (cloruro de sodio)
- Destintado usando como electrolito el NaOH (hidróxido de sodio)
- Destintado usando como electrolito el Na₂SO₄ (sulfato de sodio)

La calificación designada se realiza en base a la escala de Likert, en la tabla II-2 se presentan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método, siendo el adecuado aquel que acumule el puntaje más alto.

Tabla II-2

Escala de calificación Likert

Escala de puntuación	Puntuación
Excelente	5
Muy buena	4
Buena	3
Regular	2
mala	1

Fuente: elaboración propia (2022).

Tabla II-3

Selección del método experimental de destintado de pulpa de papel

Factor a evaluar	Comentarios del evaluador	Clasificación		
		Destintado con NaCl como electrolito	Destintado con NaOH como electrolito	Destintado con Na ₂ SO ₄ como electrolito
Costo	La disponibilidad del NaCl en el mercado es mayor y tiene mejor precio	5	3	3
Disponibilidad de equipos	Todos los procesos requieren material básico de laboratorio	5	5	5
Impacto ambiental	<p>El NaOH es un compuesto corrosivo, contaminante de la fauna acuática por encima de los 20 mg/litro.</p> <p>El Na₂SO₄ es peligroso si llega a tomas de agua</p> <p>Por otro lado, durante el proceso usando el NaCl se libera una pequeña cantidad de cloro gaseoso y en la solución se forma sosa caustica</p>	3	2	2

Rendimiento	El rendimiento de los procesos está dentro del rango del 75 al 80 %	4	4	5
Aplicabilidad a la pulpa de papel reciclada	Todos los procesos son aplicables, el Na ₂ SO ₄ es el más inerte de los tres procesos	4	4	5

Fuente: elaboración propia (2022).

Tabla II-4

Matriz de decisión para el método experimental para el destintado de la pulpa de papel

Factor evaluado	Valoración porcentual	Destintado usando el NaCl como electrolito		Destintado usando el NaOH como electrolito		Destintado usando el Na ₂ SO ₄ como electrolito	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<i>Costo</i>	15	5	15	3	9	3	9
<i>Disponibilidad de equipos</i>	25	5	25	5	25	5	25
<i>Impacto ambiental</i>	10	3	6	2	4	2	4
<i>Rendimiento</i>	25	4	20	4	20	5	25
<i>Aplicabilidad a la pulpa de papel</i>	25	4	20	4	20	5	25
Total	100		86		78		88

Fuente: elaboración propia (2022).

Tomando en cuenta los resultados de la Tabla II-4, el método seleccionado es “DESTINTADO USANDO EL NaCl COMO ELECTROLITO” para el destintado de la pulpa de papel por tener disponibilidad en el mercado, menor costo y un rendimiento bueno.

2.3. Diseño factorial

Experimentar es variar deliberadamente las variables habituales de trabajo para encontrar mejores maneras de proceder y ganar al mismo tiempo un conocimiento más profundo sobre el comportamiento de productos y/o procesos. La cuestión a resolver en el diseño de experimentos reside en decidir qué conjunto de pruebas pondrán de manifiesto, de forma más clara y con menor esfuerzo, los diversos aspectos de interés del problema.

Selección de variables del proceso factorial

La etapa principal del proceso para destintar pulpa de papel es el burbujeo resultante del proceso electrolítico del agua, la electrolisis del agua requiere que se haga pasar una corriente eléctrica por un circuito formado por dos electrodos y un medio líquido iónico (con iones disueltos) y una fuente eléctrica que es la que provee la diferencia de potencial variable (voltaje).

En el proceso se pueden controlar variables que influyen la velocidad de separación, tales como: **la diferencia de potencial (variación del voltaje), distancia entre electrodos (separados unos centímetros) y el tiempo utilizado en el proceso de separación.** Dado que reposicionar los electrodos en la cuba electrolítica cada vez que se necesite en la medición (6,8,12 centímetros) resulta una tarea difícil y complicada, se resuelve dejarlos permanentemente en su sitio separados a 10 centímetros.

Respecto a la cantidad de pulpa alimentada en cada prueba, se añadirá de manera que permita ver cómo afecta el tiempo en la separación.

Diseño factorial 3k

El diseño factorial es un arreglo de K factores que tiene tres niveles cada uno. Se usarán letras mayúsculas para diferenciar a los factores entre sí, para representar los niveles de los factores que son en este caso cuantitativos se usaran los dígitos: -1 (bajo), 0 (medio) y alto (1).

Con esto se facilita el ajuste en el modelo de regresión que relaciona la respuesta con los niveles los factores, utilizando el diseño más simple del sistema 3k es el diseño 3², el cual tiene dos factores, cada uno con tres niveles.

Tabla II-5

Codificación de los factores o variables

Variables	Nivel		
	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
<i>Diferencia de potencial</i>	-1	0	+1
<i>Tiempo del proceso de separación</i>	-1	0	+1

Elaboración propia. (2022).

Tabla II-6

Valores asignados para los tres niveles de cada factor

Variables	Nivel		
	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
<i>Diferencia de potencial (voltios)</i>	8	12	16
<i>Tiempo del proceso de separación (minutos)</i>	15	30	45

Fuente: elaboración propia (2022).

Para obtener el número de experimentos se usa la fórmula:

$$3^K$$

Donde:

- 3 son la cantidad de niveles
- K representa el número de factores
- Resultando en $3^2 = 9$ experimentos
- Como se realizarán dos repeticiones: $9 * 2 = 18$ experimentos, mostrado mejor en la Tabla II-7

Tabla II-7

Diseño factorial para el proceso de separación

N.º del experimento	Diferencia de voltaje	Tiempo del proceso de separación	Masa de tinta extraída	Masa de tinta extraída (repetición)
1	-1	-1	V 1	V 10
2	0	-1	V 2	V 11
3	+1	-1	V 3	V 12
4	-1	0	V 4	V 13
5	0	0	V 5	V 14
6	+1	0	V 6	V 15
7	-1	+1	V 7	V 16
8	0	+1	V 8	V 17
9	+1	+1	V 9	V 18

Fuente: Elaboración propia. (2022).

V= variable resultante de la medición

Para mejor entendimiento se puede resumir el experimento en la tabla II-8.

Tabla II-8

Experiencias con sus variables

N.º del experimento	N.º del experimento (repetición)	variable	
		voltaje	tiempo
<i>1</i>	<i>10</i>	<i>8 V</i>	<i>15 min.</i>
<i>2</i>	<i>11</i>	<i>12 V</i>	<i>15 min.</i>
<i>3</i>	<i>12</i>	<i>16 V</i>	<i>15 min.</i>
<i>4</i>	<i>13</i>	<i>8 V</i>	<i>30 min.</i>
<i>5</i>	<i>14</i>	<i>12 V</i>	<i>30 min.</i>
<i>6</i>	<i>15</i>	<i>16 V</i>	<i>30 min.</i>
<i>7</i>	<i>16</i>	<i>8 V</i>	<i>45 min.</i>
<i>8</i>	<i>17</i>	<i>12 V</i>	<i>45 min.</i>
<i>9</i>	<i>18</i>	<i>16 V</i>	<i>45 min.</i>

fuelle: Elaboración propia. (2022).

2.4. Pruebas preliminares

Antes de comenzar con las pruebas en la pulpa de papel, se realiza la **curva de absorción, la curva de calibración y la determinación del nivel de blancura de la pulpa** antes y después del destintado.

Para la determinación de ambas curvas en el análisis de la pulpa se usó el equipo espectrofotómetro de luz UV visible de marca: J.P Selecta; modelo LIBRA S22;

rango: 325-1000 nanómetros, la cual se programa en la configuración que muestra la absorbancia en la pantalla.

Curva de absorción y curva de calibración

El procedimiento desarrollado fue el siguiente:

- llenar un matraz con 150ml de la tinta líquida
- esta solución 100% pura tinta, llamada *solución 1*, se usa para preparar las diluciones según la Tabla II-9, se toma como concentración pura por no encontrar información válida y congruente sobre la densidad de la misma.
- encender en equipo de espectrofotometría de luz UV-visible
- iniciar las mediciones de la absorbancia a diferentes longitudes de onda para cada una de las 5 diluciones elaboradas.
- registrar el resultado final en una gráfica de **absorbancias vs longitud de onda**.

Tabla II-9

Diluciones usando la fórmula: $V_{\text{(aforado)}} * \text{porcentaje} = V_{\text{(consumido)}}$

solución	Volumen aforado (ml)	Volumen consumido de la solución 1 (ml)	Porcentaje de la dilución (%)
1	-	-	100
2	25	17.5	70
3	25	12.5	50
4	25	7.5	30
5	25	2.5	10
Total, de solución 1 usada (ml)		40	

Fuente: Elaboración propia. (2022).

En la figura 2-1 se observan diluciones en matraces aforados de 25ml.

Figura 2-1

Diluciones de la tinta



Fuente: elaboración propia. (2022).

Los resultados de los análisis para armar la curva de absorción de cada disolución se presentarán en las tablas a continuación:

Tabla II-10

Absorbancia y longitud de onda para una concentración de 10% de tinta

Concentración (%)	Longitud de onda (nm)	Absorbancia
10	490	0.265
	500	0.21
	510	0.158
	520	0.101
	530	0.039
	540	0.034
	550	0.072
	560	0.085
	570	0.246
	580	0.226
	590	0.189
	600	0.128
	610	0.083
	620	0.57
	630	0.042
640	0.03	

Fuente: Elaboración propia, (2022).

Tabla II-11**Absorbancia y longitud de onda para una concentración de 30% de tinta**

Concentración (%)	Longitud de onda (nm)	Absorbancia
30	490	0.343
	500	0.29
	510	0.239
	520	0.188
	530	0.127
	540	0.046
	550	0.011
	560	0.004
	570	0.327
	580	0.304
	590	0.266
	600	0.206
	610	0.16
	620	0.132
	630	0.112
640	0.1	

Fuente: Elaboración propia, (2022).

Tabla II-12

Absorbancia y longitud de onda para una concentración de 50% de tinta

Concentración (%)	Longitud de onda (nm)	Absorbancia
50	490	0.493
	500	0.44
	510	0.389
	520	0.341
	530	0.275
	540	0.203
	550	0.167
	560	0.157
	570	0.456
	580	0.412
	590	0.388
	600	0.369
	610	0.33
	620	0.308
	630	0.313
640	0.308	

Fuente: Elaboración propia, (2022).

Tabla II-13

Absorbancia y longitud de onda para una concentración de 70% de tinta

Concentración (%)	Longitud de onda (nm)	Absorbancia
70	490	0.644
	500	0.583
	510	0.524
	520	0.465
	530	0.388
	540	0.298
	550	0.268
	560	0.275
	570	0.491
	580	0.476
	590	0.45
	600	0.391
	610	0.337
	620	0.307
	630	0.297
640	0.282	

Fuente: Elaboración propia, (2022).

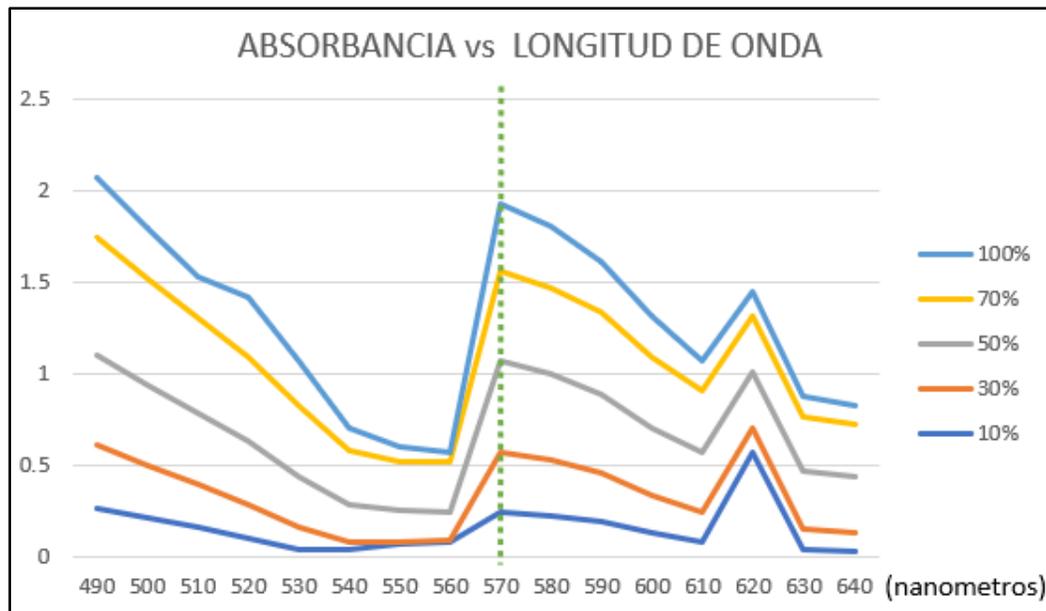
Tabla II-14
Absorbancia y longitud de onda para una concentración de 100% de tinta

Concentración (%)	Longitud de onda (nm)	Absorbancia
100	490	0.327
	500	0.273
	510	0.223
	520	0.321
	530	0.243
	540	0.121
	550	0.104
	560	0.088
	570	0.526
	580	0.433
	590	0.372
	600	0.235
	610	0.160
	620	0.134
	630	0.117
640	0.103	

Fuente: Elaboración propia, (2022).

Figura 2-2

Grafica de la absorbancia vs longitud de onda

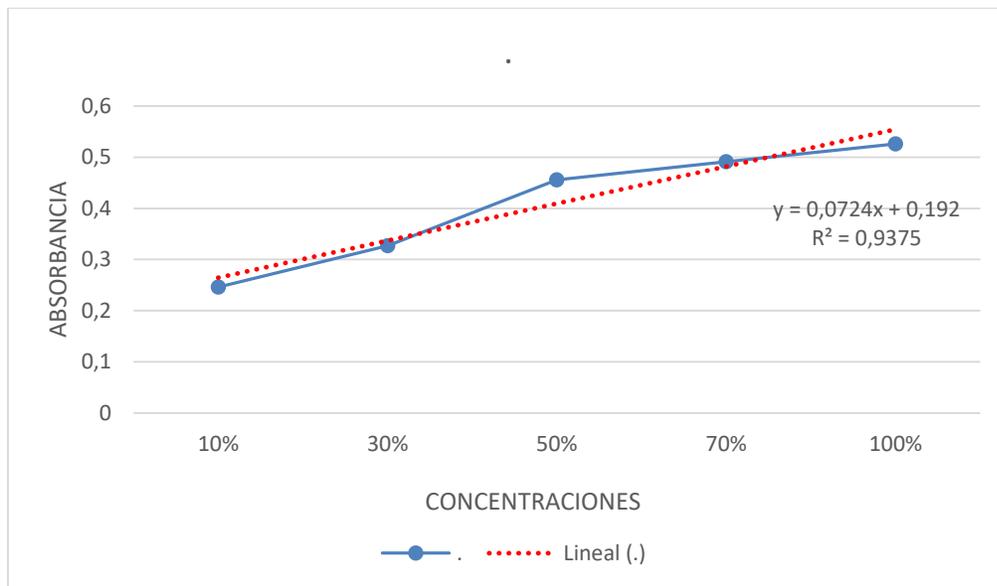


Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la figura 2-2 se observa que la toma de muestra más estable para las diluciones de las Tablas: II-10, II-11, II-12, II-13 y II-14 está en el pico que se forma a **570** nanómetros en el espectrofotómetro UV-visible.

Para armar la curva de calibración se toman los datos de absorbancia a 570nm como se muestra en la figura 2-3.

Figura 2-3
Curva de calibración resultante



Fuente: elaboración propia (2022)

La figura 2-3 nos indica que la curva es un incremento lineal de la absorbancia cumpliendo el requisito de pertenecer a la zona de Lambert-Beer. También nos indica la pendiente de la curva que es igual al **coeficiente de absorción** de la tinta:

$$\varepsilon=0.0724$$

2.5. Determinación del nivel de blancura de la pulpa impresa

Para la trituration se usó el procesador marca: ARNO modelo: OPTIMIX PLUS y para análisis se usó el equipo espectrofotómetro de luz UV visible de marca J.P. Selecta; modelo LIBRA S22; programado en la configuración que mide la absorbancia.

El procedimiento se desarrolló de la siguiente manera:

- triturar dos hojas de papel impreso con la adición de agua destilada hasta lograr una pasta homogénea y consistente en el triturador
- colocar una muestra homogénea en dos cubetas del centrifugador

- luego de centrifugar con una pipeta tomar una muestra líquida en tres cubetas del espectrofotómetro
- se enciende el espectrofotómetro
- la muestra se analiza 3 veces en un rango de **570** nanómetros
- se registra el resultado, como se muestra en la Tabla II-15
- mediante la ley de Beer-Lambert ($A = \epsilon \cdot l \cdot c$) calcular la concentración promedio de la solución

$$C = \frac{A}{(\epsilon)(l)}$$

Datos:

$\epsilon = 0.0724$ (dato dado por la prueba anterior)

$l = 1$ cm

A = absorbancia de la muestra

Tabla II-15

Resultados de los análisis de la muestra

Papel impreso			
Muestra	1	2	3
Absorbancia	0.158	0.155	0.159
Concentración de tinta (mg/litro)	2.182	2.141	2.196
Concentración de tinta promedio (mg/litro)			2.173

Fuente: elaboración propia (2022).

2.6. Procedimientos empleados para la obtención de resultados

La parte experimental de la presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias “LOU” y el Laboratorio de Física, dependientes de la Universidad Juan Misael Saracho”.

Descripción de los equipos utilizados

Cuba electrolítica

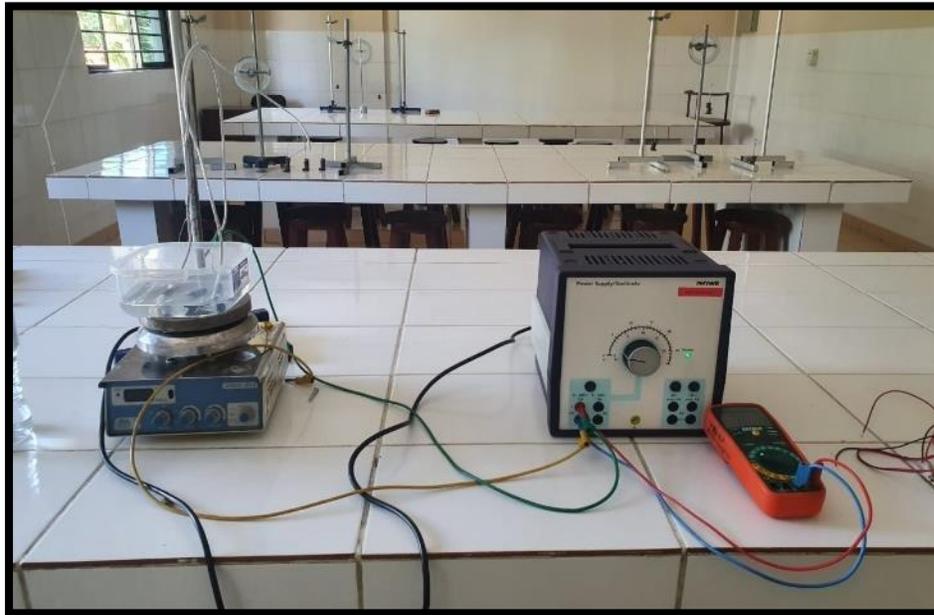
Denominada también celda electrolítica, es un dispositivo que descompone al electrolito (NaCl) mediante una corriente eléctrica es decir realiza la electrolisis. Formado por una cubeta de plástico cuadrado de 20 centímetros y con una capacidad de 1 litro. Está instalado encima del agitador magnético y con soportes para mantener fijos a los electrodos.

En la figura 2-4 se observa el armado realizado para el funcionamiento de la cuba electrolítica en el Laboratorio de Física.

Figura 2-4

Cuba electrolítica





Fuente: elaboración propia (2022)

Fuente regulable

Permite ajustar voltajes en un determinado rango según las necesidades, es este caso admite ajustar los valores entre 0 y 30 voltios en corriente continua y alterna.

Voltímetro

Instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico. En el experimento se utilizó un voltímetro digital para mas precisión.

Triturador

Consiste en un soporte con una cuchilla afilada que gira a altas velocidades, utilizada para triturar la materia prima y convertirla en una pasta de papel.

Balanza analítica

Mide la masa con un alto grado de precisión, con un rango de los 0.01 gramos (4 decimales) hasta el kilogramo. Usada para el pesaje de toda la materia prima.

Material de laboratorio utilizado

En la tabla II-16 se detalla el material utilizado.

Tabla II-16**Material de laboratorio utilizado**

Material	Especificación	Cantidad
Electrodos	De grafito	2
Cronometro	Digital	1
Vasos de precipitación	250 mililitros	2
Espátula	----	1
Pinza doble nuez	----	2
Soporte	----	2
Guantes de latex	----	1 par
Varilla de vidrio	----	1
Cable	N° 12, en metros	2
Papel filtro	En pliegues	1

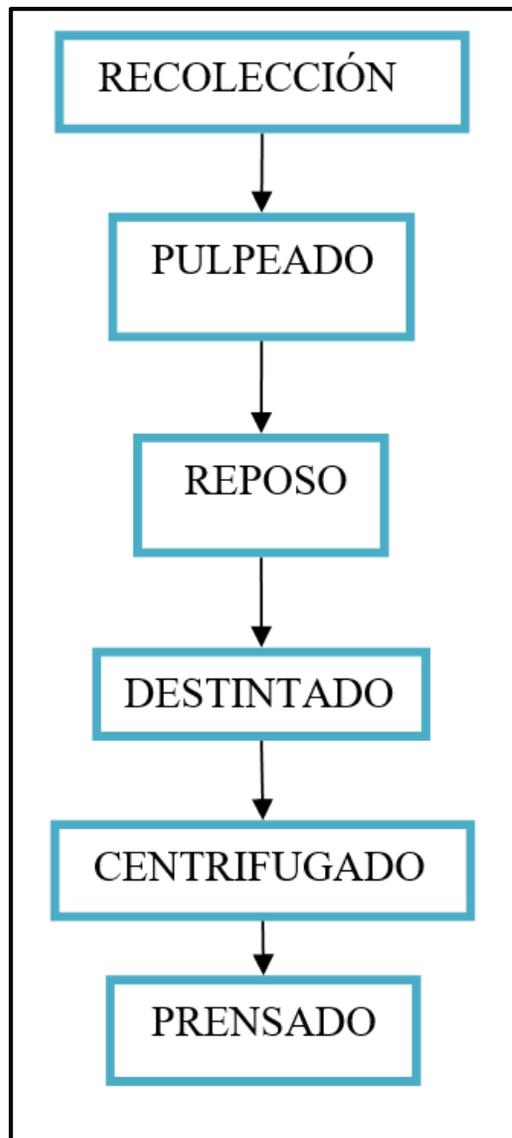
Elaboración propia. 2022.

2.7. Descripción del proceso tecnológico experimental para la separación de tinta de la pasta de papel

El proceso se describe en la figura 2-5:

Figura 2-5

Diagrama de bloques orientativo del proceso de la separación de la tinta de la pasta de papel reciclado



Fuente: elaboración propia 2022.

Recolección de la materia prima

La materia prima utilizada para la parte experimental, constituida por hojas tamaño carta de papel para impresoras, las hojas estuvieron almacenadas en su paquete original y fueron impresas un día anterior, con la finalidad de trabajar con hojas en buena condición. Como se muestra en la figura 2-6.

Figura 2-6

Materia prima recolectada



Fuente: elaboración propia (2022).

Pulpeado

Primero se despedaza las hojas manualmente para aligerar el trabajo de la máquina, luego se añade el papel picado de 3 hojas al triturador y 500 ml de agua destilada, suficiente para sumergir todo el papel, posteriormente se obtiene una pasta que almacenada en un recipiente cerrado. Como se observa en la figura 2-7.

Figura 2-7

Papel picado y pasta terminada



Fuente: elaboración propia (2022).

Reposo

Se recoge la pasta en un recipiente de base que se cubre con un film plástico para que no ingresen partículas externas, se deja reposar un par de horas.

Destinado por electroflotación

Una vez armada la cuba electrolítica, se inicia añadiendo los 500 ml de pulpa de papel (a temperatura ambiente) a la cubeta. Seguidamente se conecta la fuente (voltaje de acuerdo al diseño experimental) y se enciende el agitador magnético a un cuarto de las revoluciones máximas. el cronometro inicia, se controla: que el imán en rotación no entre en contacto con los electrodos, que no rebalse el líquido y que se produzca burbujeo en la superficie. En la figura 2-8 se observa a la cuba electrolítica antes y durante el proceso de electroflotacion.

Figura 2-8

Proceso de electroflotación





Fuente: elaboración propia (2022).

Centrifugación

Al finalizar la electroflotación con una malla fina se filtra el producto obtenido para separar gran parte del agua residual, posteriormente se coloca a centrifugar hasta que se note las fases (sólido y líquido) separadas como se muestra en la figura 2-9. Se repite para cada etapa y se recoge una muestra líquida para su análisis en el espectrofotómetro.

Figura 2-9

Muestras luego del centrifugado



Fuente: elaboración propia (2022).

Prensado y almacenado

La pasta aun húmeda se prensa hasta un grosor determinado, el producto obtenido está listo para almacenarlo en un lugar seco o para ser añadido a la línea de producción de papel comercial. En la figura 2-10 se observa la pasta prensada manualmente.

Figura 2-10
Pasta prensada



Fuente: elaboración propia (2022).

2.8. Balance de materia

Los balances de materia contabilizan las entradas y salidas de materia y energía a largo de todo el proceso de separación. Dichos balances están basados en la ley de conservación de masa y energía.

Los cálculos que se muestran a continuación fueron realizados en función a los datos experimentales de la Tabla II-17.

Tabla II-17

Datos para el balance de materia

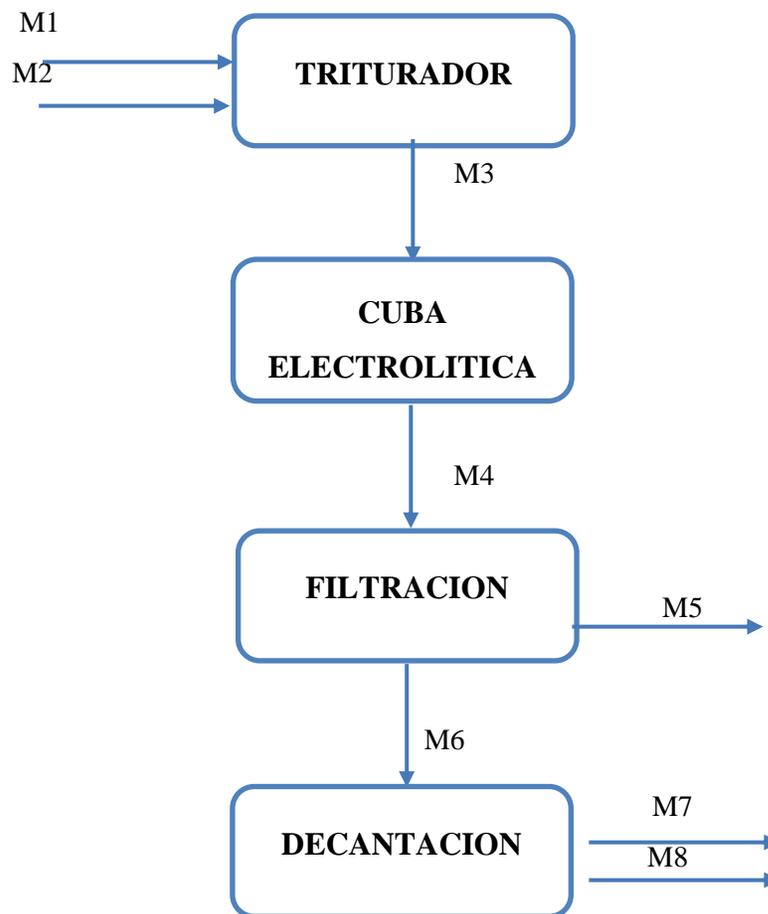
Datos	Valor	Unidad
Densidad del H ₂ O(**°C)	0.9978	g/ml
Volumen de agua inicial	500	ml
Tiempo de extracción	5	horas
Masa de pulpa de papel inicial	8.216	gramos
masa de pulpa de papel más blanca prensada	8.131	gramos

Fuente: elaboración propia (2022).

2.9. Balance de materia del proceso experimental de la separación de la tinta de pulpa de papel reciclado

Figura 2-11

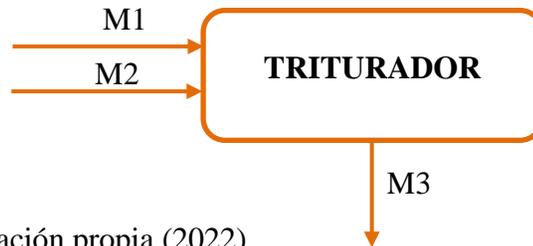
Resumen del balance de materia



Fuente: elaboración propia (2022).

Balance general

$$M1+M2=M5+M7+M8 \quad \text{Ec: (1)}$$

Balance de materia en el triturador**Figura 2-12****Balance de materia en el triturador**

Fuente: elaboración propia (2022).

Balance en la etapa de trituración

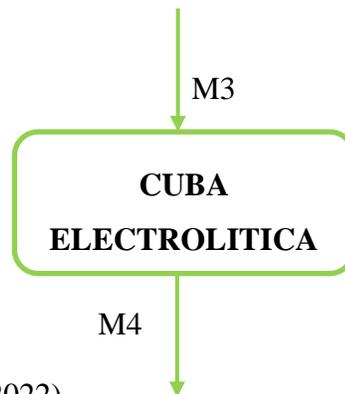
$$M1 + M2 = M3 \quad \text{Ec(2)}$$

Donde:

M1: masa de papel impreso troceado

M2: masa de agua inicial

M3: masa de pulpa de papel triturada

Balance de materia en la cuba electrolítica**Figura 2-13****Balance de materia en la cuba electrolítica**

Fuente: elaboración propia (2022).

Balance en la etapa de electroflotación

$$M3=M4 \quad \text{Ec: (3)}$$

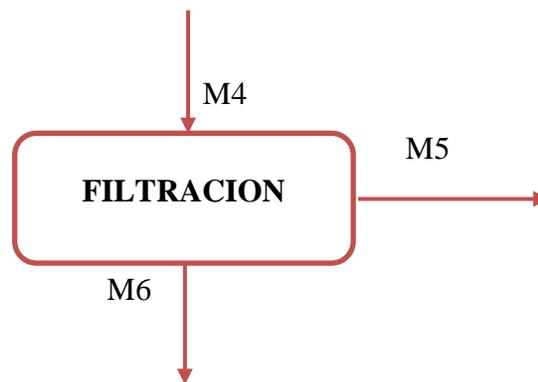
M3: masa de pulpa de papel triturada

M4: masa de pulpa de papel más blanca

Balance de materia en la filtración

Figura 2-14

Balance de materia en la filtración



Fuente: elaboración propia (2022).

Balance en la etapa de filtración

$$M4=M5+M6 \quad \text{Ec:(4)}$$

M4: masa de pulpa de papel más blanca

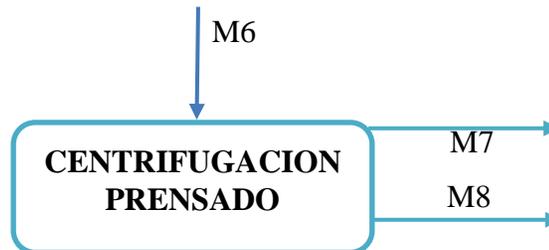
M5: masa de agua residual con tinta disuelta

M6: masa de pulpa de papel más blanca filtrada

Balance de materia en el centrifugador y prensado

Figura 2-15

Balance de materia en el centrifugador y prensado



Fuente: elaboración propia (2022).

Balance en la etapa del centrifugador

$$M6 = M7 + M8 \quad \text{Ec (5)}$$

M6: masa de pulpa de papel más blanca filtrada

M7: masa de pulpa de papel más blanca prensada

M8: masa de agua residual con tinta disuelta

Resolución

$$M7 = 8.131 \text{ gr}$$

$$M8 = 80 \text{ ml} * 0.9978 \text{ gr/ml} = 79.82 \text{ gr}$$

Reemplazando datos en Ec. (5)

$$M6 = 8.131 \text{ gr} + 79.82 \text{ gr} = 87.951 \text{ gr}$$

$$M2 = 500 \text{ ml} * 0.9978 \text{ gr/ml} = 498.6 \text{ gr}$$

Reemplazando datos en Ec. (2)

$$M3 = 498.6 \text{ gr} + 8.216 \text{ gr} = 506.81 \text{ gr}$$

Reemplazando datos en Ec. (3)

$$M4 = 506.81 \text{ gr}$$

Reemplazando datos en Ec. (4)

$$M5 = 506.81 \text{ gr} - 87.951 \text{ gr} = 418.86 \text{ gr}$$

Masa de agua residual con tinta disuelta

$$79.82\text{gr} + 418.86\text{gr} = 498.67 \text{ gr}$$

$$498.67 \text{ gr} / (0.9978 \text{ gr/ml}) = 499.77 \text{ ml}$$

2.10. Balance de energía

Durante los procesos de convertir el papel en pulpa húmeda y posteriormente en una pulpa más blanca no ocurren cambios de fase ni cambios significativos de temperatura, solo se indicará la potencia eléctrica de los equipos por el tiempo que fueron usados, como se muestra en la tabla II-18.

Tabla II-18

Kw/H utilizados en el proyecto

	Potencia (watts)	kilowatts	Tiempo de utilización total (hora)	KW/h utilizados
Potencia de la trituradora	320	0.32	0.2	0.06
Potencia del agitador	640	0.64	9	5.76
Potencia de la fuente	200	0.2	9	1.8
Potencia del centrifugador	520	0.52	4.5	2.34
Total				9.96

Fuente: elaboración propia (2022).

2.11. Análisis estadístico del diseño experimental

Los resultados del análisis estadístico, derivan del diseño experimental. Para la obtención de estos datos se utilizó el programa SPSS 26.0 (Statistical Package for the Social Sciences) para Windows. Mismo que permite integrar todas las fases que

involucran el análisis de datos, generando resultados más representativos y confiables.

Los resultados obtenidos de cada combinación, voltaje de alimentación-tiempo de alimentación, favorecieron el diseño experimental logrando determinar las variables más significativas para el proceso de extracción.

La variable respuesta de los datos experimentales, se puede expresar a través del porcentaje de tinta desprendida o del rendimiento del desprendimiento de tinta de la pulpa de papel impreso.

En la siguiente Tabla II-19, se presentan los resultados obtenidos experimentalmente durante el proceso de electrolisis.

Tabla II-19
Resultados experimentales

N° de experimento	Factores			Respuesta 1	Respuesta 2
	Voltaje (V)	Tiempo (min)	Amperaje (A)	Porcentaje de tinta desprendida (%)	Porcentaje de tinta desprendida (%)
1	+1	+1	2.24	66.21	66.72
2	+1	0	2.23	54.69	54.33
3	+1	-1	2.26	60.58	60.05
4	0	+1	1.84	61.3	61.58
5	0	0	1.87	54.36	54.64
6	0	-1	1.85	58.78	58.56
7	-1	+1	1.22	53.80	53.94
8	-1	0	1.25	50.18	49.55
9	-1	-1	1.21	47.25	47.15

Fuente: elaboración propia (2023)

Calculo del análisis de varianza

Tabla II-20

Factores inter-sujetos

		N
Voltaje	-1	6
	0	6
	1	6
Tiempo	-1	6
	0	6
	1	6

Fuente: SPSS 22.0 (2023).

En la tabla II-21 se exponen los resultados del análisis de varianza, aplicados a los datos experimentales del proceso de separación de la tinta de la pulpa de papel.

Tabla II-21

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	576.100 ^a	8	72.013	995.336	0.000
Intersección	57084.826	1	57084.826	789009.344	0.000
Voltaje	339.234	2	169.617	2344.397	0.000
Tiempo	182.421	2	91.210	1260.684	0.000
Tiempo-voltaje	54.445	4	13.611	188.131	0.000
Error	0.651	9	0.072		
Total	57651.578	18			
Total corregida	576.751	17			

R cuadrado = 0.999 (R cuadrado corregida = .998)

Fuente: SPSS 22.0 (2023).

Tabla II-22
Resumen del modelo lineal

modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0.821 ^a	0.673	0.603	3.66896

variable dependiente: porcentaje de tinta
predictores: (constante), tiempo, voltaje
Fuente: SPSS 22.0 (2023).

Tabla II-23
ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	388.293	3	129.431	9.615	0.001 ^b
	Residuo	188.458	14	13.461		
	Total	576.751	17			

Variable dependiente: porcentaje de tinta
Predictores (constante), tiempo, voltaje, voltaje-tiempo
Fuente: SPSS 22.0 (2023).

Tabla II-24
Coefficientes iniciales

modelo	Coefficientes estandarizados				t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B	
			beta				Límite inferior	Límite superior
1(Constante)	56.315	0.865		65.120	0.000	54.460	58.170	
Voltaje	5.059	1.059	0.730	4.777	0.000	2.788	7.331	

Tiempo	2.598	1.059	0.375	2.453	0.000	0.327	4.870
Voltaje-tiempo	-0.130	1.297	-0.015	-0.100	0.922	-2.912	2.652

Variables predictivas: (constante), Voltaje, Tiempo.

Variable dependiente: % de masa desprendida.

Fuente: SPSS 22.0 (2023).

Los resultados de la tabla anterior mostrados, indican que las variables (voltaje, tiempo) influyen sobre el porcentaje de tinta desprendida obtenido. Debido a que el nivel de significancia es menor al 0.05, es decir, existe una posibilidad de que las variables sean significativas sobre el proceso de separación de la tinta, con una confianza del 95%.

Excepto la interacción Voltaje x Tiempo que no es significativo ya que su valor de la cola significación es mayor a 0.05.

Luego de realizada la nueva regresión lineal se determina que se tiene un nuevo modelo y resultados.

Tabla II-25

ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	388.158	2	194.079	15.436	0.000 ^b
	Residuo	188.593	15	12.573		
	Total	576.751	17			

Variable dependiente: porcentaje de tinta

Predictores (constante), tiempo, voltaje

Fuente: SPSS 22.0 (2023).

Tabla II-26
Coefficientes finales

modelo	Coeficientes estandarizados				t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B	
			beta				Límite inferior	Límite superior
1(Constante)	56.315	0.865		67.382	0.000	54.534	58.096	
Voltaje	5.059	1.059	0.730	4.943	0.000	2.877	7.241	
Tiempo	2.598	1.059	0.375	2.538	0.023	0.417	4.780	

Variable dependiente: % de masa desprendida.

Fuente: SPSS 22.0 (2023).

En la tabla II-26 de determino que el modelo matemático ajustado para el proceso de separación de la tinta, que correlaciona el porcentaje de tinta desprendida con las variables, voltaje y tiempo de la separación, para el caso estudiado siguiente:

$$\% \text{tintadesprendida} = 56.315 + 5.059 \text{Voltaje} + 2.967 \text{Masa}$$

Por lo cual, el porcentaje de tinta desprendida está en función del voltaje aplicado y del tiempo que dura la separación.

Tabla II-27
Estadísticas de residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	N
Valor pronosticado	48.6575	63.9725	56.3150	4.77837	18
Desviación del valor pronosticado	-1.603	1.603	0.000	1.000	18
Error estándar de valor pronosticado	.0836	1.672	1.423	0.273	18
Valor pronosticado corregido	49.0596	63.3332	56.2585	4.71009	18
Residuo	-7.04417	5.06333	0.0000	3.33073	18

Desviación del residuo	-1.987	1.428	0.000	0.939	18
Residuo estud.	-2.141	1.539	0.007	1.017	18
Residuo eliminado	-8.18032	5.88000	0.05647	3.90608	18
Residuo eliminado estud.	-2.482	1.620	-0.018	1.102	18
Distancia Mahal.	0.000	2.833	1.889	0.972	18
Distancia de Cook	0.000	0.246	0.057	0.075	18
Valor de influencia centrado	0.000	0.167	0.111	0.057	18

Fuente: SPSS 22.0 (2023).

En la tabla II-26 se determinó que el modelo matemático ajustado para el proceso de separación, que se correlaciona el porcentaje de tinta desprendida obtenido con las variables, tiempo y voltaje aplicado para el caso estudiado.

Por lo cual, el porcentaje de tinta desprendida está en función del voltaje aplicado y el tiempo de separación. Por tanto, mientras mayor sea el **tiempo de separación** y si se aplica más **voltaje, se incrementa el porcentaje de tinta desprendida**.

En la tabla II-27, se realiza la comparación de los resultados del porcentaje de tinta desprendido de manera experimental respecto al porcentaje obtenido mediante el modelo matemático.

Tabla II-27

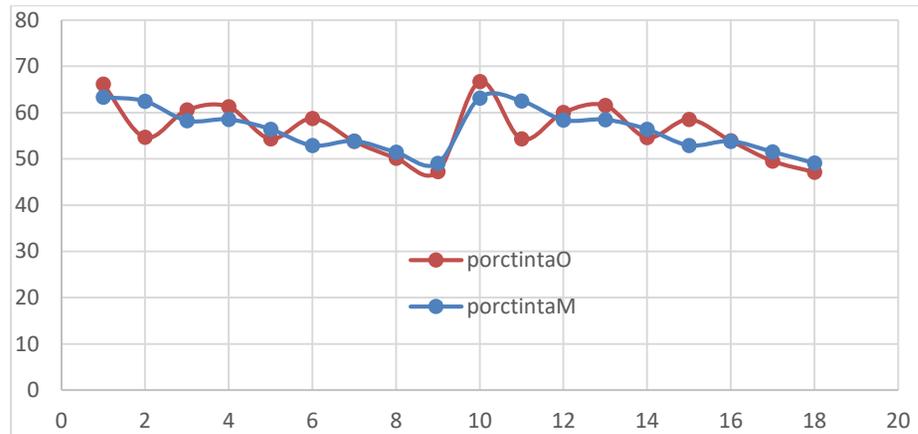
Resultados del % de separación experimental y obtenido con el análisis matemático

Voltaje	Tiempo	Datos experimento	Datos modelo matemático
1	1	66,21	63,33
1	0	54,69	62,45
1	-1	60,58	58,26
0	1	61,3	58,52
0	0	54,36	56,43
0	-1	58,78	52,90
-1	1	53,8	53,86
-1	0	50,18	51,42
-1	-1	47,25	49,05
1	1	66,72	63,18
1	0	54,33	62,51
1	-1	60,05	58,41
0	1	61,58	58,48
0	0	54,64	56,41
0	-1	58,56	52,93
-1	1	53,94	53,82
-1	0	49,55	51,53
-1	-1	47,15	49,08

Fuente: elaboración propia 2022.

Figura 2-16

Resultado del %tinta desprendido experimental vs %tinta desprendido con el modelo matematico

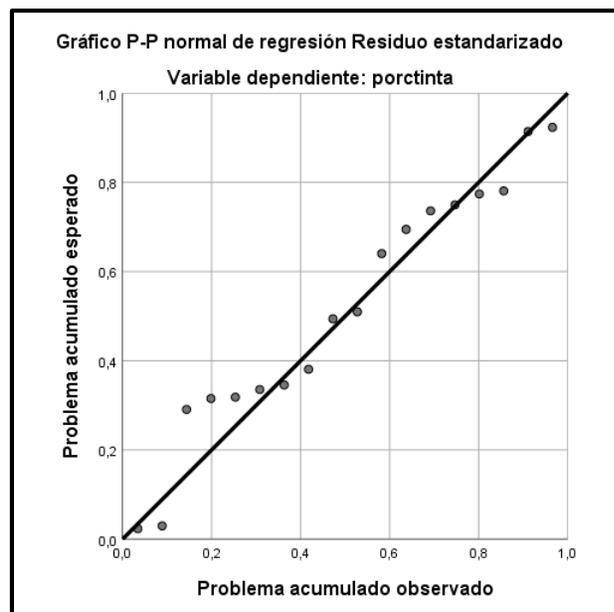


Fuente: elaboracion propia. 2023

Se observa el comportamiento del modelo vs los valores experimentales tienen un comportamiento similar..para un 95%.

Figura 2-17

Regresion lineal del porcentaje de tinta desprendida



Fuente: SPSS 22.0 (2023).

Se puede observar en el gráfico de **la curva regresión de residuos estandarizada** siguen una línea recta excepto algunos que se alejan pero que cumplen con el 95%. Se concluye del análisis estadístico lo siguiente:

- El modelo estadístico es el correcto, por lo que las variables dependientes y las variables independientes son significativas para un nivel de confianza del **95%**.
- El factor que más influye en el proceso de separación de la tinta es el **voltaje**, con una significancia elevada, seguido del tiempo de la separación, debido a que mientras más voltaje más porcentaje de tinta es desprendida.

Capítulo III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 comparación de la pulpa de papel

Las características de la pulpa de papel más blanco obtenido en la parte experimental del presente proyecto de investigación y las que se encuentran como referencia bibliográfica, se detallan a continuación en la Tabla III-1, las normas usadas para este análisis:

NB/ISO 536:2011 Determinación del gramaje (papel, cartón)

NB 503/1984 Determinación del espesor (papel, cartón)

Tabla III-1

Comparación de la pulpa de papel más blanca

Pulpa de papel prensado		
Parámetro	Comercial	Experimental
Gramaje	75 gr/m ²	88 gr/m ²
Acabado	Mate	Mate
Transparencia	No	No
Grosor	100 micras	150 micras
Efecto al tacto	Suave y liso	Suave
Estabilidad con el tiempo	Si	No

Fuente: elaboración propia. 2022.

De los resultados de arriba comparados se puede observar, que los parámetros determinados no cumplen (por la terminación final) con las características que debe presentar un papel blanco, el papel reciclado pierda capas superficiales de papel pasadas unas semanas por la humedad presente.

3.2. Cálculo de rendimiento del porcentaje de tinta desprendida

Para el cálculo de rendimiento se aplica la siguiente expresión:

$$R = \frac{\%pp}{\%pi} * 100$$

Par el cálculo del rendimiento se toma en cuenta el proceso en que se desprendió más tinta, como se muestra en la Tabla III-2.

Tabla III-2

Datos para el cálculo de rendimiento

Voltaje (V)	Tiempo (min)	Porcentaje de tinta desprendida (%)	Porcentaje de tinta inicial (%)
18	30	60	82

Fuente: elaboración propia (2022)

Se hace el cálculo de rendimiento:

$$R = \frac{60}{82} * 100$$

$$R = 73.17 \%$$

Se tiene un rendimiento bueno para el proceso de separación en cuanto se refiere al porcentaje de tinta desprendida.

3.3. Calculo de rendimiento de la masa de tinta desprendida en relación con la masa de pulpa inicial

Volumen de agua con tinta = 0.499 litros

Densidad de la tinta = 2.173 gr/l

$$m = \delta_{\text{tinta}} * V_{\text{agua con tinta}}$$

$$m = 2.173 \text{ g/l} * 0.499.771$$

$$m = 1.086 \text{ gr}$$

$m_2 =$ masa de papel inicial = 8.216 gr

Para el cálculo de rendimiento se aplica la siguiente expresión:

$$R = \frac{\%m}{\%m_2} * 100$$

Se hace el cálculo de rendimiento:

$$R = \frac{1.086}{8.216} * 100$$

$$R = 13.22 \%$$

Se tiene un rendimiento pobre para el proceso en cuanto a cantidad de masa de tinta desprendida en relación con la masa de pulpa de papel añadida a la separación.

Voltaje vs porcentaje tinta en la pulpa blanqueada

Esta variable presenta tres niveles que son 8V, 12V y 16V y con las cuales se realiza el proceso de separación.

Tomando en cuenta los datos obtenidos se construye la Tabla III-3.

Tabla III-3

Datos de porcentaje obtenido con relación al voltaje

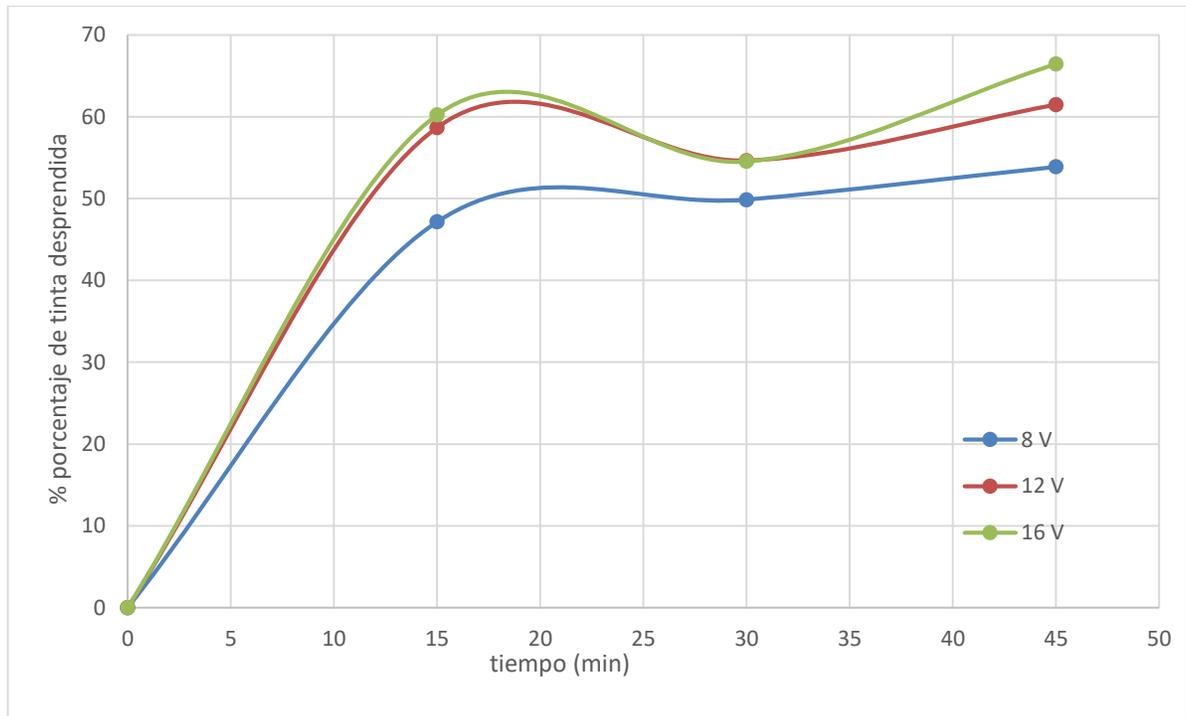
Voltaje (V)	Tiempo (min)	Porcentaje de tinta
8	15	47.15
	30	49.86
	45	53.87
12	15	58.68
	30	54.64
	45	61.47
16	15	60.23
	30	54.53
	45	66.45

Fuente: Elaboración propia 2022.

Se observa en principio que a 16 voltios se tiene una mayor separación de la tinta.

Figura 3-1

Porcentaje de tinta obtenido vs tiempo en relación al voltaje



Fuente: Elaboración propia (2022).

En la figura 3-1 se observa que se obtuvieron **mayores** porcentajes de tinta desprendida trabajando con un voltaje de 16 V, los cuales son más **altos** en comparación con los obtenidos a los 8V y 12V, por lo tanto, se concluye que la cantidad de voltaje óptimo de operación es de 16 V.

Relación de tiempos con respecto a los volúmenes obtenidos

Dentro del proceso se observa que la relación tiempo-voltaje influye en el porcentaje de **tinta desprendida**, por lo que se realiza un análisis del tiempo y el voltaje en la separación con respecto a porcentaje obtenido.

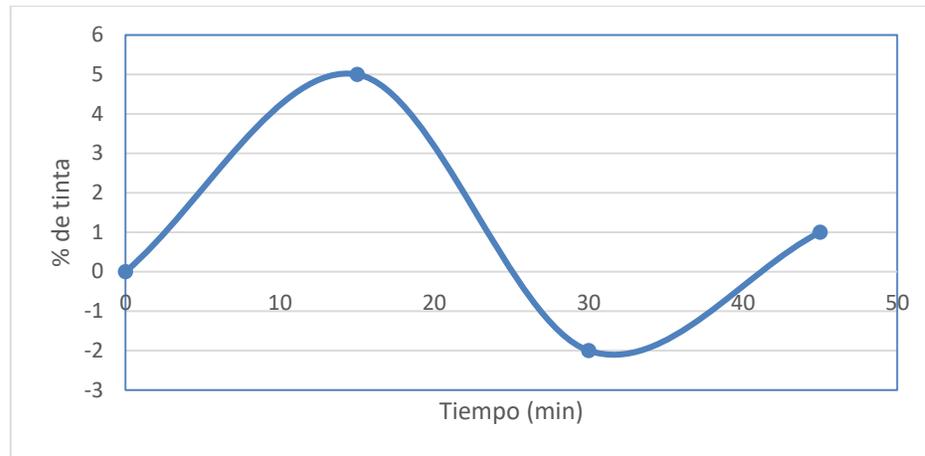
En la Tabla III-4 se presentan los datos del tiempo con relación del porcentaje obtenido con un voltaje de 16V de la primera repetición.

Tabla III-4**Relación de los tiempos con respecto a los porcentajes obtenido**

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Amperaje Promedio (A)	Porcentaje de tinta	Acumulado
0	0	0	0	0
15	8	2.40	60.23	60.23
30	12	2.48	-5.7	54.53
45	16	2.58	+6.2	66.45

Fuente: elaboración propia (2022).

En el tiempo de **15** min se obtiene un porcentaje de tinta considerable, sin embargo, de acuerdo a los datos observados, a los **30** minutos de separación hay un aumento en el porcentaje de tinta, para posteriormente a los **45** minutos reducirse. En la figura 4-1 se presenta los datos de la Tabla III-4.

Figura 4-1**Porcentaje obtenido vs tiempo de extracción**

Fuente: elaboración propia (2022).

De la curva de porcentaje extraído se concluye que el tiempo óptimo para la separación es de **15 min**, debido a que se presentan mejores condiciones de operación y representa el **90.63 %** del total extraído, considerando también el bajo incremento del mismo para los tiempos posteriores.

Capítulo IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Respondiendo a los objetivos planteados en el presente proyecto de investigación, basados en los resultados, las conclusiones son las siguientes:

- Para la caracterización de la materia prima, hojas de papel impreso, se determinó el porcentaje de tinta desprendida promedio de un **73%**, utilizando un espectrofotómetro UV.
- Referente a la separación de la tinta del papel impreso mediante electroflotación, resulta más adecuado trabajar con **15 voltios** y durante un periodo corto de tiempo, con una separación entre los electrodos de **5 cm**.
- Los resultados de diseño factorial, utilizando el programa estadístico SPSS 22 indican que las variables tiempo de separación y el voltaje aplicado, influyen significativamente sobre el porcentaje de tinta desprendida, lo cual no sucede con la variable de integración tiempo-voltaje.

El rendimiento del proceso experimental es **13.22%** de porcentaje de tinta desprendida en relación con la masa inicial de acuerdo al experimento con mayor volumen obtenido.

- Se produce una pequeña cantidad no significativa de sosa caustica en las aguas residuales luego de la electroflotación.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda a los que elaboradores de papel, realizar una caracterización previa de la materia prima para una adecuada selección de método de separación.
- En la experimentación verificar que la rotación generada en la cuba electrolítica no sea demasiado rápida como para rebosar la cuba, también revisar que los electrodos estén correctamente sujetos y no raspen al imán que gira.
- Para ahorrar energía se recomienda usar una cuba con el mayor volumen posible, de esta manera se procesará más pulpa de papel.

- Usar tensoactivos en la flotación para aumentar el rendimiento de la tinta recogida.
- Se recomienda (si es posible) valorar el papel reciclado con las siguientes normas:
 - **NB 503/1984 Determinación de humedad (papel, cartón)**
 - **NB 505/1985 Determinación de la resistencia a la rotura por tracción (papel, cartón)**