

Evaluación en el destintado para la obtención de papel reciclado

Evaluation in deinking to obtain recycled paper

Héctor Hugo Riojas González*, Leonel Maldonado Rivera, Juan López Hernández
Universidad Politécnica de Victoria. Av. Nuevas Tecnologías 5902 Parque Científico Tecnológico de Tamaulipas
Carretera Victoria-Soto La Marina Km 5.5 Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87138.
* hriojasg@upv.edu.mx

Resumen

Las tecnologías limpias son importantes para el desarrollo de las sociedades, siendo el reciclado una de las más utilizadas en la actualidad. Este trabajo de experimentación tiene como finalidad evaluar la técnica de una celda de flotación para el destintado de papel y la calidad que se obtendría de la hoja reciclada. Los experimentos incluyen la variación de reactivos, flujos y velocidades para encontrar los mejores resultados de calidad. Se regularon parámetros tales como pH, temperatura, velocidad y agitación de la celda y dosificación de reactivos durante el proceso de eliminación de la tinta de la pasta. Después de varias pruebas se llegó a la conclusión que entre más aire fluye dentro del sistema de celda de flotación, más burbujas se generan y más tinta se desprenderá pero se debe mantener entre un 20 y 40% de la mezcla original de la pasta papelera durante el proceso de flotación, en el caso de los parámetros para el proceso de la celda de flotación, los mejores resultados se realizaron con una presión de 80 psi, en un rango de caudal entre 250 L/h y 2500 L/h con un tiempo entre 15 y 25 minutos de ciclo. En el caso de la calidad de la hoja reciclada, se tuvieron los mejores resultados aplicando una prensa hidráulica que tuvo como finalidad la unión de fibras de la celulosa mejorando las propiedades mecánicas de la hoja, finalmente se realizaron pruebas de impresión láser, adherencia, dispersión de la tinta, resistencia y blancura, todas estas pruebas dieron buenos resultados en términos generales, lo que se le atribuye a la técnica empleada en este trabajo experimental.

Abstract

Clean technologies are important for the development of societies, with recycling being one of the most used today. The purpose of this experimentation work is to evaluate the technique of a flotation cell for the use of paper and the quality that would be obtained from the recycled sheet. Experiments include the variation of reagents, flows and velocities to find the best quality results. Parameters such as pH, temperature, speed and agitation of the cell and reagent dosing were regulated during the pulp ink removal process. After several tests it was concluded that the more air flows into the flotation cell system, the more bubbles are generated and the more ink will come off but 20 to 40% of the original paper pulp mixture must be maintained during the flotation process, in the case of the parameters for the flotation cell process, the best results were performed with a pressure of 80 psi, in a flow range between 250 L/h and 2500 L/h with a time between 15 and 25 minutes of cycle. In the case of the quality of the recycled sheet, the best results were obtained by applying a hydraulic press that had the purpose of joining cellulose fibers improving the mechanical properties of the sheet, finally laser printing, adhesion, dispersion tests were performed of the ink, resistance and whiteness, all these tests gave good results in general terms, which is attributed to the technique used in this experimental work.

Palabras clave:

Reciclado, papel, destinte, celda de flotación, surfactantes

Keywords:

Recycling, paper, destination, flotation cell, surfactants

Introducción

La demanda de papel aumenta progresivamente debido a sus innumerables aplicaciones. Su producción implica un gran impacto ambiental, siendo necesaria la búsqueda de técnicas e innovaciones que reduzcan de manera significativa estos problemas para el ambiente. La basura es uno de los problemas de mayor preocupación a nivel mundial [1] donde el reciclaje proporciona una mejor opción para reducir los desechos de papel y plásticos [2]. Es vital maximizar el aprovechamiento de los residuos a la vez que se minimiza los residuos generados durante los procesos de recuperación y reprocesamiento [3]. Aunque es uno de los temas más discutidos, los procedimientos de reciclaje son poco conocidos [4], de igual manera los modelados cinéticos del proceso de flotación (celda de flotación agitada mecánicamente, la columna de flotación y la flotación por aire disuelto) son críticos en la

relación burbuja/partícula y su correlación del modelo en los parámetros de la turbulencia [5]. Encontrar un proceso efectivo y de calidad para reciclado de papel hoy en día es de suma importancia ambiental para un modelo de desarrollo sustentable. La flotación es el proceso mediante el cual las partículas de tinta son separadas de la pasta a través de un sistema de aireación, formando una espuma en la parte superficial para ser retirada [6]. Las celdas de flotación han demostrado tener resultados muy favorables a pesar de la falta de una norma de estandarización para métodos que hacen uso de ellas. En este trabajo experimental se hizo una exploración de una celda de flotación de tipo tanque agitado en el cual la suspensión acuosa obtenida de la fibra celulosa logra desprender las partículas de tinta de la fibra, también se considera en el trabajo experimental la formación del papel reciclado.

Desarrollo

Materiales

El papel para reciclaje utilizado en este trabajo está conformado de papel de desperdicio en una oficina que utiliza impresión láser de 60 g·m⁻². Se utilizó una licuadora Taurus Pegaso 750W para pulverizar, triturar y crear la pulpa de papel. Para la remoción de tinta en la pulpa se utilizó una celda de flotación IMT-TM02 de la compañía Zhengzhou Shuliy Machinery. Los equipos PHI-KIT de Hach y BAPRE-3 de Rhino se utilizaron para la medición del nivel de pH y pesaje de materiales respectivamente. La conformación del papel reciclado se realizó mediante una prensa hidráulica. Los surfactantes empleados durante los experimentos son: SPAN 80 (agente espumante y dispersante) y SYNPERONIC PE (agente colector), también se empleó hipoclorito de sodio (cloro, sustituto de hidróxido de sodio), bicarbonato de sodio adquiridos por Croda Inc, jabón líquido, jabón en polvo, además de enzimas proteasa y enzimas amilasa encontradas en el producto constituido en GV-Zyme y zeolita.

Métodos: Para la obtención de pulpa de papel reciclado primero se tritura y pulveriza el papel con agua en una licuadora [7]. Posteriormente se añade esta mezcla a la celda de flotación, el papel se tritura en pequeñas tiras de aproximadamente 23 mm de largo y 4 mm de ancho para facilitar la conversión en pasta. Se realizaron tres pruebas con diferentes formas y tamaños del papel triturado para determinar si la geometría influye en la calidad de la pasta como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de papel triturado.

Geometría	Dimensiones	Forma de obtención
Tiras	23mm x 4mm	Máquina trituradora de oficina
Círculos	7 mm de Diámetro	Perforadora manual
Cuadros rasgados	15mm x 11mm aprox	Rasgado manual

Cantidad de agua utilizada en la molienda

Para definir la cantidad de agua necesaria para realizar la molienda con los 20 g de papel triturado se realizaron pruebas, cada una con distinta cantidad de agua, las pruebas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Representación datos para gráficas

Muestra	Características de Muestra
C1	0.2 L de agua, 30 segundos de molienda
C2	0.5 L de agua, 30 segundos de molienda
C3	0.5 L de agua, 90 segundos de molienda
C4	0.75 L de agua, 30 segundos de molienda
C5	0.75 L de agua, 90 segundos de molienda
C6	1 L de agua, 30 segundos de molienda
C7	1 L de agua, 90 segundos de molienda

Las propiedades del papel están relacionadas con la resistencia de la fibra, el grado de enlazado en la red fibrosa y la calidad de estos enlaces. Los enlaces necesitan una fase líquida polar, por lo cual se usa el agua de manera regular [8]. En la Tabla 3 se listan los parámetros y sus variaciones durante el proceso de obtención de la pulpa de papel.

Tabla 3. Variación de parámetros en el proceso de obtención de pulpa

Parámetro	Variación	Objetivo
Volumen de agua (litros)	0.2, 0.5, 0.75, 1	Mejorar la calidad final del papel
Proporción papel-agua (gramos/litro)	5, 10, 20	Mejorar la densidad de la pulpa (ISO-5264, 2002) [13]
Velocidad (rpm)	800-950	Mejorar consistencia de la pulpa
Volumen de agua y tiempo (litros-segundos) 20gr-papel	0.2-30, 0.5-30, 0.5-90, 0.75-30, 0.75-90, 1-30	Mejorar calidad y consistencia de la pulpa
Tiempo de reposo durante aplicación de Zeolita (horas) 1litro-pulpa/60gr-zeolita	0.5, 2	Purificar para mejorar las condiciones de la mezcla
Volumen de multienzimático (ml)	2, 5, 7	Remoción de la tinta
Volumen de jabón líquido (ml)	2, 5, 7	Limpieza y remoción de la tinta
Masa de jabón en polvo (gr)	4, 8	Limpieza y remoción de la tinta
Volumen de cloro (ml)	2, 5, 7	Mejorar el blanqueo del papel final
Masa de bicarbonato (gr) 2ml-surfactante/1litro-pulpa/14litros-agua/10min-tiempo de flotación/2500l-hr-presión de caudal/ {2, 5, 7 ml}-cloro	4, 8	Mejorar la calidad de pasta papelera
Cantidad de agua para el bastidor	3, 4, 5 y 6 litros	Determinar la cantidad exacta de pulpa se disuelva
Prensado de papel	600 psi	Mejorar el acabado estético de la textura de la hoja

Para el proceso de destintado se han empleado diferentes reactivos con la finalidad de generar burbujas finas capaces de interactuar en la interfaz tinta/fibra/agua [9] en la aplicación de este proceso se han empleado surfactantes (Synperonic, Span y combinado), pH (7 y 9) y temperatura (50 y 75°C). El proceso de flotación se realizó con una presión de 80 psi, con un rango de caudal entre 250 L/h y 2500 L/h y con un tiempo de 5, 10, 15 y 20 minutos de flotación. Adicionalmente se agregó un detergente multienzimático de 5 mL con una concentración concreta del 15% estas últimas son recomendaciones del fabricante para el uso del producto GV-Zyme, en la Figura 1 se presenta el diagrama del proceso del método empleado.



Figura 1. Diagrama de flujo de proceso del reciclado de papel

En la siguiente etapa se realizó el moldeo de una hoja tamaño carta, en donde se montaron bastidores con 16 mm de grosor, los cuales están conformados por marcos donde sostienen las pruebas que están sujetas a una tela. Se determinaron ensayos de cuatro tipos de telas con la finalidad de obtener mejores resultados en base a la textura de la tela. El acabado estético otorgado a la hoja formada, se comentará más adelante, cuando se presenten los resultados del papel reciclado para impresora (ver el área de resultados apartado de prueba de impresión). La adherencia, filtración y absorción de agua se analizó en el bastidor, las telas empleadas en estas pruebas fueron de manta, magaly, seda, gasa y fieltro. Finalmente las pruebas de secado se realizaron con 6 muestras de hoja, las cuales fueron secadas por distintos métodos a condiciones diferentes, para de esta manera determinar que método sería el que consumiría menor tiempo, los métodos utilizados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones y método de secado

Muestra	Método de Secado	Temperatura	Condiciones del día
C1.1	Sol al exterior	27°C	Soleado
C1.2	Ventilador	27°C	Soleado
C1.3	Calentador eléctrico	27°C	Soleado
C1.4	Sol al exterior	18°C	Nublado
C1.5	Ventilador	18°C	Nublado
C1.6	Calentador	18°C	Nublado

Aplicación de prensa hidráulica para el acabado estético:

Con el propósito de mejorar la calidad de la hoja confeccionada, tras el proceso del bastidor, la hoja se transfiere a una prensa hidráulica, ya que esta proveería a la hoja de un mejor acabado tanto estético (textura), como dimensional (espesor de la hoja), lo cual traería mayor uniformidad a la hoja, además al someter la hoja a presión, la prensa actuaría como un “exprimidor” retirando el exceso de agua en la hoja confeccionada y disminuiría el porcentaje de humedad así como el tiempo de secado.

Para el estudio de calidad de la hoja reciclada se consideró la blancura, la reflexión de luz, resistencia horizontal y dispersión de tinta. Uno de los aspectos a considerar del papel es la blancura ya que es el objetivo principal del destintado de papel, para esto se utilizó un software de imágenes para medir saturación y niveles RGB de la hoja. Se midió la blancura escaneando la hoja convirtiéndola en imagen en

donde se analiza en el software Paint.NET, software especializado de imágenes, la cantidad de color que tiene la hoja y las saturación, el blanco perfecto presenta una combinación RGB de 255, 255, 255 y en el código HSV se cuenta con la combinación 0, 0, 100. Para el estudio de resistencia horizontal, se empleó la metodología de desplazamiento de fluidos para medir la mojabilidad aplicando el método de Amott el cual involucra solamente la imbibición del agua. Se mojó con agua cada una de las hojas la cantidad de 1 ml y se le fue añadiendo en el área húmeda algunos pesos de 4.2, 5.4, 7 y 10.2 gramos, la hoja con mayor resistencia sería aquella que soportara más peso en el área mojada. Otra de las pruebas de calidad realizadas fue el de dispersión de tinta o pintura en donde se deja caer una gota (2 cm de distancia y 2 mg de gota aproximadamente) de pintura o tinta y se mide el diámetro, entre menor sea el diámetro mejor calidad es el papel. Para lo cual se analizaron propiedades indeseables (áspero y poroso) que no debía tener el papel para su aplicación en una impresora láser, buscando con esto que el papel fuera lo más liso posible, para que la gota de tinta se fije en el lugar que debe, buscando tener un grosor de por lo menos 0.31 mm para tener mejor resistencia en las pruebas realizadas. De acuerdo a los datos obtenidos de las diferentes pruebas se realizó un análisis estadístico de regresión lineal, de coeficiente de correlación de Pearson y gráfico de barras con límites, para esto se usó minitab.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tipo de triturados: Una vez que los mejores resultados fueron obtenidos por el triturado entrecruzado, ya que este genera buenas características de molienda. Se prosiguió a determinar la cantidad de papel a utilizar, la pasta papelera con 20 gr de papel se consideró como la mejor opción para trabajar, esta mezcla (20 gr) fue la que permitía trabajar con más cantidad de papel, lo que ayudaría a ahorrar la cantidad de agua empleada en esta etapa.

De los resultados que se obtuvieron en la pruebas, la prueba de 20 gramos con 1 litro fue la que arrojó los mejores resultados. En el caso de la velocidad de molienda se generaron dos velocidades de 800 rpm y de 950 rpm, en el caso de la primera velocidad está dentro de los parámetros que sugiere el fabricante del equipo (800 rpm), en el caso de la otra velocidad (950 rpm) no genera una gran diferencia en la mezcla, por lo que se decidió emplear la primera velocidad (800 rpm). Para establecer el tiempo de la molienda, se consideraron 20 de gramos de papel triturado y 1 litro de agua añadidos y 90 segundos de molienda, esta muestra fue la que obtuvo los mejores resultados respecto a las características que se buscaban para la pasta papelera, pues no ocasionó un esfuerzo para el equipo, mostrando una pasta homogénea notablemente uniforme, lo que proporciona un mejor acabado estético de la hoja.

Zeolita: Dicha sustancia no otorgó características positivas a la pulpa en ninguna de sus dosis y pruebas, sobretodo la

consistencia que otorgo a la pulpa, impedía la distribución de esta sobre el bastidor. Sin embargo debido a que es un purificador natural, esta podría ser utilizada para elaborar un filtro y purificar el agua residual de las flotaciones.

Multienzimático: En el caso de esta sustancia no todas las dosis generaron resultados positivos, puesto que, aunque todas lograron que la pulpa cambiara su tonalidad original, siendo la dosis de 7ml la que tuvo un efecto negativo ya que oscurecía la pulpa, solamente la dosis de 5ml logro generar la cantidad de espuma correcta que la celda necesita, es importante determinar las implicaciones de una disminución en el consumo de reactivos de flotación y agua, regulando la espuma [10], la Figura 2 muestra las cantidades de espuma que fueron generadas con cada dosis. La Tabla 5 presenta las condiciones de muestreo y las características que estas le otorgaron.

Tabla 5. Características de la pulpa con Multienzimático

Prueba	Dosis	Cantidad de agua	Características
D1	2ml	1L	Genera poca espuma, no la suficiente para que salga por el vertedero.
D2	5ml	1L	Genera espuma compacta y no en exceso
D3	7ml	1L	Le da un tono verde a la pulpa
			Comienza a generar más espuma de la requerida.



Figura 2. Espuma generada respecto a la dosis

Detergente líquido: El detergente no causaba ningún problema al momento de confeccionar la hoja, sin embargo durante el momento de la flotación generaba espuma en exceso, lo que ocasionaba pérdidas grandes de pulpa de papel.

Detergente en polvo: Este detergente genera restos en la pulpa ya flotada, por lo que era necesario enjuagar la pulpa en agua limpia, después de haber sido filtrada, sino se hacía, la pulpa quedaba con residuos de jabón la cual presentaba una consistencia babosa y dificultaba el moldeo de la hoja. Al igual que con el detergente líquido, generaba espuma en exceso durante la flotación y durante el pulpeo haciendo que este último fuera difícil de realizar.

Bicarbonato: Por si solo el bicarbonato no hacía ningún cambio en la pulpa, no cambiaba su consistencia, tonalidad, adherencia en la tela o generaba espuma al momento de la flotación, sin embargo al combinarlo con las sustancias que le conferían, el olor a la pulpa con el bicarbonato lo eliminaba por completo, sobre todo los olores penetrantes como el del cloro.

Surfactantes: Cada surfactante le daba características distintas a la pulpa, esto es debido a los índices de flotación iónica [11] dando mejores resultados la combinación de ambos, puesto que la consistencia que le daba a la pulpa favorecía el moldeo y secado de la hoja (Tabla 6).

Tabla 6. Características de la pulpa con surfactantes

Prueba	Características
E1 (Span) Con 2ml con 1 L de agua	El oleato de sorbitán se utiliza como agente humectante y dispersante
E2 (Synperonic) Con 2ml con 1 L de agua	Agente solubilizante, emulsionante y tensoactivo
E3 (Combinación) Con 2ml con 1 L de agua	Otorga un olor fuerte y cambia la consistencia haciéndola similar a la del Synperonic pero más líquida

De acuerdo a estos resultados, podemos considerar que la mezcla de ambos surfactantes generan una sinergia que hace que el proceso de remoción de la tinta se realice de manera más efectiva, este fenómeno puede deberse a la cinética de detergencia y a la fase acusa en la que se encuentra el surfactante para que actué como un agente que ayude al destinte.

Blancura: La blancura que obtenga del papel reciclado tiene que ver con el tiempo de flotación, teniendo los mejores resultados entre los 15 y 25 minutos de ciclo. Y el coeficiente de determinación nos indica que la relación entre las variables es de un 31%, esto quiere decir que si hay relación ligeramente buena, esto también se puede apreciar por el coeficiente de Pearson de casi 0.5 lo que se puede considerar como una relación estable.

Zeolita: Esta sustancia no tuvo resultados favorables, tornando la pulpa color beige y con puntos color café.

Multienzimático y surfactantes: En todas las dosis se logró cambiar la tonalidad de la pulpa (Figura 3), sin embargo al agregar más de 5 ml la pulpa se tornaba del color verde oscuro que tiene el jabón, de acuerdo a los datos obtenidos del software de imágenes los cuales se muestran en la Tabla 7 y 8. Comprobando que el mejor resultado fue obtenido con la dosis de 5ml.

Tabla 7. Resultados del software de imágenes para el multienzimático

Prueba	Dosis	R	G	B	PROM
D1	2ml	214	214	212	213
D2	5ml	238	235	228	234
D3	7ml	214	190	163	189

Durante el proceso se observó que entre más aire fluyera dentro del sistema, más burbujas se generaban y más tinta se desprende, pero con el inconveniente de que al mismo tiempo se pierde una cantidad de papel (entre un 20 y 40% de la mezcla original); del mismo modo el caudal se relaciona directamente con la blancura, ya que se pudo apreciar a simple vista el cambio de la mezcla original a la ya flotada, y en contraparte los residuos también se puede apreciar que

entonan un color grisáceo. En la Figura 4 se observa el desempeño de los surfactantes en cuanto a la calidad de la hoja.

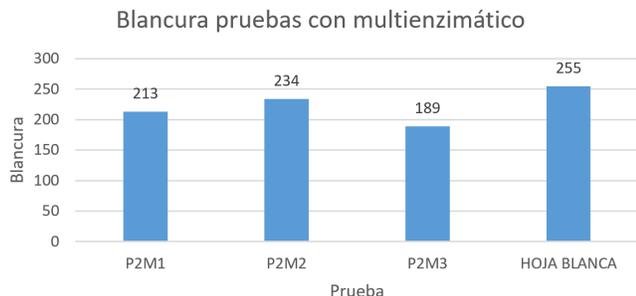


Figura 3. Blancura de acuerdo a las dosis de multienzimático

Tabla 8. Resultados del software de imágenes para los surfactantes

Prueba	Dosis	R	G	B	PROM
P6S1 (Span)	2ml	237	237	235	236
P6S2 (Synperonic)	2ml	255	255	253	254
P6S1-2 (Combinación)	2ml	248	250	251	250

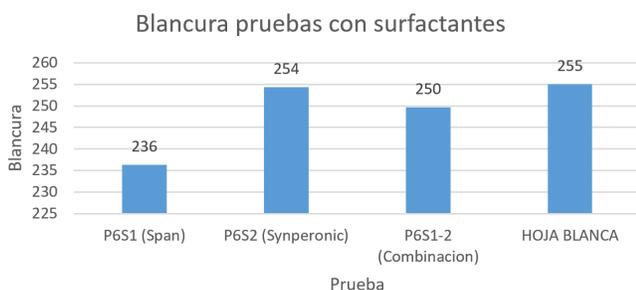


Figura 4. Blancura de acuerdo a las dosis de surfactantes

Detergente en polvo: Es capaz de destintar la pulpa en comparación al color original de está cambiándola a una tonalidad visualmente perceptible, la Figura 5 muestra el comportamiento de destintado con respecto a las diferentes dosis manejadas en comparación con una hoja bond nueva, de acuerdo a los datos obtenidos del software de imágenes los cuales se muestran en la Tabla 9 se muestra que el mejor resultado fue obtenido con la dosis de 8g.

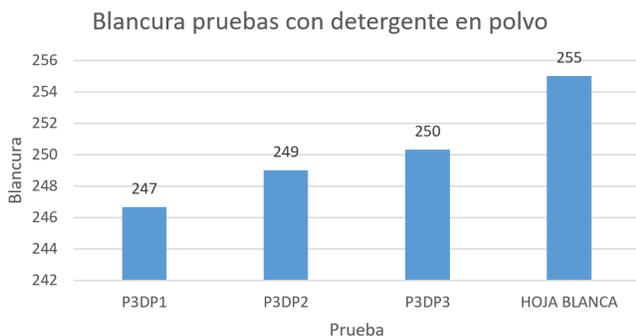


Figura 5. Blancura de acuerdo a las dosis de detergente en polvo

Tabla 9. Resultados del software de imágenes para el detergente en polvo

Prueba	Dosis	R	G	B	PROM
F1	2g	245	248	247	247
F2	4g	248	250	249	249
F3	8g	250	251	250	250

Detergente líquido: Al igual que el detergente en polvo, también fue capaz de destintar la pulpa, comportándose de diferente manera con cada dosis, sin embargo dicho detergente era de un color azul tono que en ocasiones es perceptible.

La Figura 6 muestra la capacidad de remoción de la tinta con respecto a las diferentes dosis manejadas en comparación con una hoja bond nueva, de acuerdo a los datos obtenidos del software de imágenes los cuales se muestran en la Tabla 10. Comprobando que el mejor resultado fue obtenido con la dosis de 5ml y 7ml.

Tabla 10. Resultados del software de imágenes para el detergente líquido

Prueba	Dosis	R	G	B	PROM
F1	2ml	247	249	248	248
F2	5ml	253	255	254	254
F3	7ml	255	254	254	254

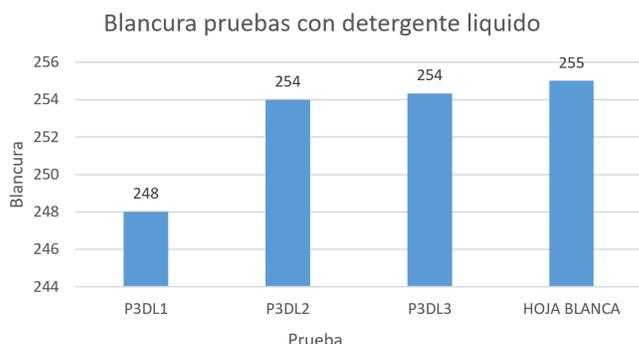


Figura 6. Blancura de acuerdo a las dosis de detergente líquido

Cloro y bicarbonato: Los resultados de esta sustancia fueron realmente favorables, puesto que fue capaz de blanquear la pulpa considerablemente, sin embargo entre más cloro era agregado a la pulpa esta comenzaba a tornarse de color amarillo, además con cualquiera de sus dosis ocasionaba que las orillas de las hojas se tornaran color amarillo. La Figura 7 muestra el comportamiento del cloro con respecto a las diferentes dosis manejadas en comparación con una hoja bond nueva, de acuerdo a los datos obtenidos del software de imágenes los cuales se muestran en la Tabla 11. Comprobando que el mejor resultado fue obtenido con las dosis de 5 y 7ml, sin embargo como se mencionó anteriormente las dosis mayores a 5ml tornan un color amarillento en la hoja. Finalmente en el caso del bicarbonato no tuvo ningún efecto de remoción de tinta sobre la pulpa.

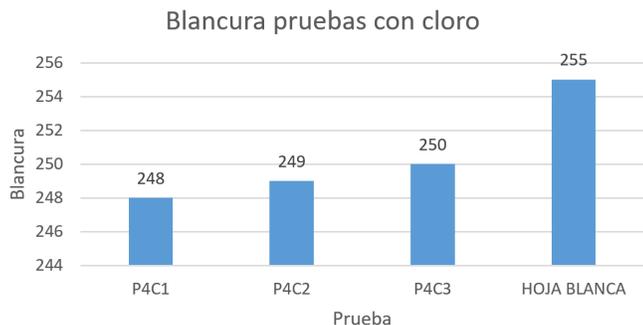


Figura 7. Blancura de acuerdo a las dosis de cloro

Tabla 11 Resultados del software de imágenes para el cloro

Prueba	Dosis	R	G	B	PROM
P4C1	2ml	246	248	250	248
P4C2	5ml	247	249	251	249
P4C3	7ml	252	251	247	250

Mejor tela para bastidor en el moldeo: En el caso de esta parte del proceso se realizaron pruebas con diferentes telas las cuales fueron fieltro, seda, manta, Magaly y gasa, las cuales se evaluarían de acuerdo a su capacidad de adherencia, absorción y filtrado de agua, al momento de realizar el moldeo de la hoja, y después de varias pruebas, se llegó a la conclusión que la mejor opción para este proceso es la tela de gasa.

Cantidad de agua para moldeo: De las 5 pruebas realizadas, solo las pruebas 3, 4 y 5 litros, permitieron que el bastidor realizara su función. La prueba de 3 litros de agua tuvo el mejor resultado, ya que este permitía realizar el moldeo de la hoja correctamente y además consumía menos cantidad de agua al momento de su moldeo.

Acabado estético: los resultados obtenidos para lograr una fibra más resistente, lisa, uniforme y a la vez con una considerable reducción a la humedad, se obtuvieron notoriamente entre las muestras que fueron prensadas y las que no, ya que las muestras que fueron prensadas tienen una tendencia a disminuir el porcentaje de humedad en ella por lo que en consecuencia esto provocara un menor tiempo de secado (Figura 8), lo que acelera el proceso, finalmente puede verse notablemente visible que la muestra C7 (mezcla de 1 L de agua, 20 g de papel y 90 segundos de molienda) contiene el menor porcentaje de humedad de todas las muestras analizadas. En la misma Ilustración 8 se puede observar la comparación de los beneficios de prensar o no prensar, las hojas prensadas presentan una disminución de tiempo de secado relativamente notable.

Una vez de que se determinó que la mejor opción es prensar las hojas para acelerar el secado, se probó realizar el proceso de secado mediante diversos medios, y se obtuvieron resultados muy prometedores ya que al emplear un calentador su tiempo de secado se reduce hasta un 79%, es decir que el tiempo de secado de una hoja con un calentador tarda solo 10 minutos, una disminución de tiempo de secado relativamente buena considerando que el tiempo de secado al sol tarda aproximadamente 48 minutos en un día soleado (Figura 9).

Eficiencias en los porcentajes de humedad

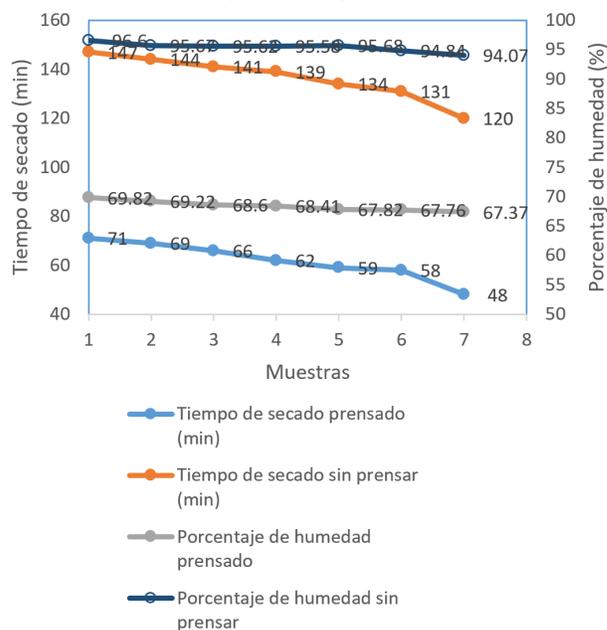


Figura 8. Eficiencias en los porcentajes de humedad y tiempo de secado

Comparación Tiempo de Secado con Ventilador, Calentador, al Sol

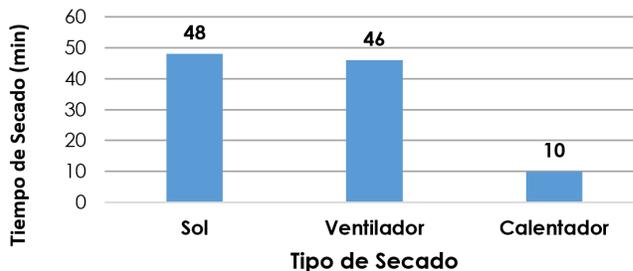


Figura 9. Comparación Tiempo de Secado con Ventilador, Calentador, al Sol

Estudio de resistencia horizontal: En la Figura 10 se muestra cuáles fueron los pesos que lograron soportar cada una de las pruebas de la observación, tomando como punto de comparación la resistencia que muestra la hoja nueva, cualquier valor cercano a la línea muestra que su resistencia es la ideal.

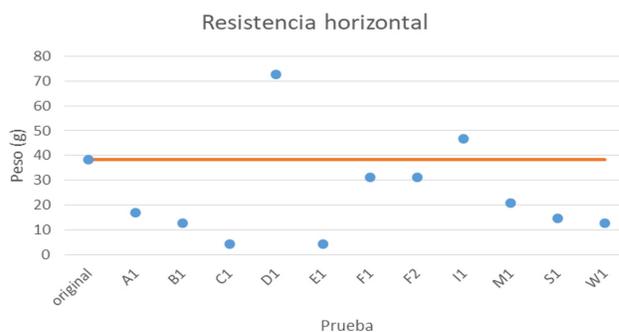


Figura 10. Resultados de la resistencia horizontal en la hoja

Los mejores resultados se logran con la hoja prensada, debido a que la hoja se compacta uniendo más las fibras de la

celulosa de papel, mejorando con ello las propiedades mecánicas de la hoja.

Estudio dispersión de tinta: En esta prueba lo que se analizó fue que tanto se dispersa una gota de agua con colorante para así poder determinar el buen uso de la hoja de papel reciclado, las hojas con menor diámetro son las que mejor calidad de dispersión de tinta tienen, ya que lo que se busca es que no se corra la tinta al escribir (Figura 11).

Prueba de impresión: Para la prueba de impresión se eligieron hojas aleatorias en una impresora, en ellas se les imprimió un fragmento, lo que se analizó fue si la hoja resistía los rodillos, o sea, si no se desahía dentro de la impresora; si el calor de impresión no le afectaba a la hoja, y si la tinta se podía impregnar en la misma hoja. Los resultados fueron satisfactorios, las hojas recicladas si pueden ser reutilizadas. Para el caso de demostrar que la hoja puede ser reutilizada, algunos autores han demostrado que con la presencia de estireno-acrilato y óxidos de hierro en el tóner, se puede reducir la capacidad de desincrustación y con ello una mejor reutilización de la hoja reciclada [12].

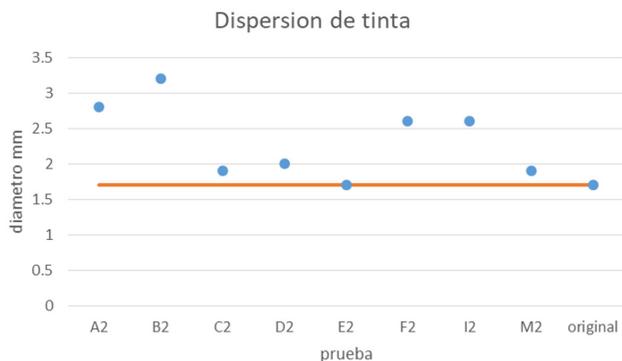


Figura 11. Resultados de las pruebas de dispersión de tinta

En la Figura 12 se muestra una comparación del nivel de blancura logrado con respecto al color original de la pulpa, en el cual se puede apreciar de mejor manera la capacidad de remoción de tinta de cada sustancia, mientras que en la Figura 13 se aprecia cuáles son las pruebas que se acercan más al resultado idóneo de blancura, el cual corresponde al número 255 según el software de imágenes utilizado; este número es representado por la recta color rojo que aparece en el gráfico, es decir que los puntos que se encuentran más alejados a este límite son los que obtuvieron resultados negativos ya sea que no se destintaron o que su capacidad de remoción de tinta fuera de un nivel bajo, contrario a lo anterior, los puntos más cercanos al límite son los que obtuvieron resultados favorables, siendo estos los que tienen mejor capacidad de remoción de tinta.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los parámetros de operación obtenidos en el proceso de la celda de flotación, los mejores resultados se obtuvieron en una presión de 80 psi, con un rango de caudal

entre 250 L/h y 2500 L/h, en un tiempo de 15 y 25 minutos por ciclo. Durante la molienda se logró un mejor triturado en forma de entrecruzado el cual llegó a ser más adecuado para la formación de la pasta papelera, por otro lado, se llegó a la conclusión que entre más aire fluya dentro del sistema de flotación, más burbujas se generarán y por lo tanto más tinta se desprenderá pero, sin embargo se debe mantener entre un 20 y 40% de la mezcla original de la pasta papelera durante el proceso de la celda de flotación. Finalmente en el caso de la elaboración de la hoja reciclada se obtuvieron buenos resultados en pruebas de impresión láser, también generó buena adherencia y dispersión de la tinta, resistencia y blancura, todos estos resultados que se generaron en la hoja reciclada se lo atribuimos a la técnica empleada.

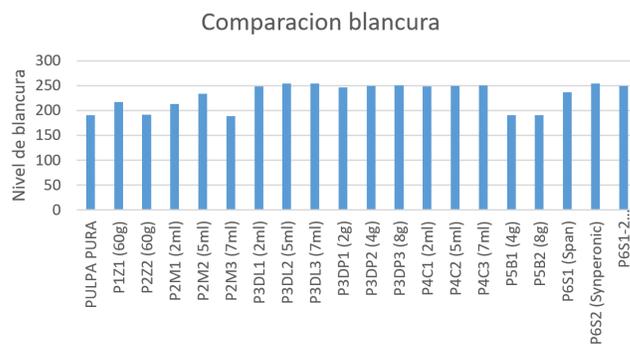


Figura 12. Comparación capacidad de remoción de tinta respecto a la pulpa pura

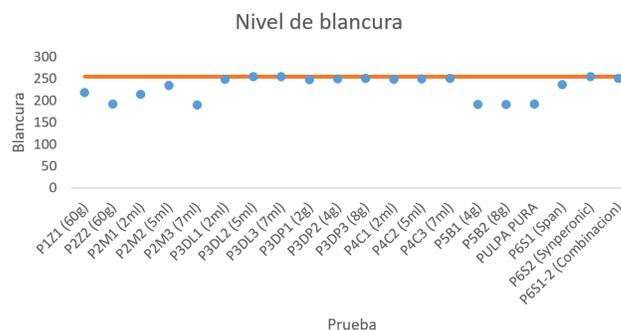


Figura 13. Comparación de los niveles de blancura de todas las pruebas

REFERENCIAS

- [1] Reyes C., A.; Pellegrini B., N.; Reyes G., R.E. (2015). *El reciclaje como alternativa de manejo de los residuos sólidos en el sector minas de Baruta*, Estado Miranda, Venezuela. Revista de Investigación, vol. 39, núm. 86, pp. 157-170.
- [2] Rupesh K. P., Prem V., Pradeep K. (2008). *A goal programming model for paper recycling system*. Omega, Volume 36, Issue 3, Pages 405-417.
- [3] Catlin J. R., Wang Y. (2013). *Recycling gone bad: When the option to recycle increases resource consumption*. Journal of Consumer Psychology, Volume 23, Issue 1, Pages 122-127.

- [4] Rutkowski J. E., Rutkowski E. W. (2017). *Recycling in Brasil: Paper and Plastic Supply Chain*. Resources, 6(3), 43, 1-15.
- [5] Wanga G., Ge L., Mitra S., Evans G.M., Joshi J.B., Chen S.. (2018). *A review of CFD modelling studies on the flotation process*. Minerals Engineering, Volume 127, 153-177.
- [6] Meyfroidt P., Rudel T. K., Lambin E. F. (2010). *Forest transitions, trade, and the global displacement of land use*. PNAS, 7, 107 (49), 20917-20922.
- [7] Ewijk S. V., Stegemann J. A., Ekins P. (2017). *Global Life Cycle Paper Flows, Recycling Metrics, and Material Efficiency*. Journal of Industrial Ecology, Volume 22, Number 4, 686-693.
- [8] Robles N. F., Saucedo A. R., Delgado E., Sanjuán R. y Turrado J. (2018). *Efecto de las microfibras de celulosa sobre papel con alto contenido de fibra reciclada*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 5(24), 70-79.
- [9] El-Shall H., Moudgil B.M., El-Midany A. (2005). *Separation of Ink Particles from Waste Paper by Fine-bubbles*. KONA, No.23, 122-128.
- [10] Nuorivaara Ted, Björkqvist Anna, Bacher John, Serna-Guerrero Rodrigo. (2019). *Environmental remediation of sulfidic tailings with froth flotation: Reducing the consumption of additional resources by optimization of conditioning parameters and water recycling*. Journal of Environmental Management, Volume 236, 125-133.
- [11] Peng W., Chang L., Li P., Han G., Huang Y., Cao Y.. (2019). *An overview on the surfactants used in ion flotation*. Journal of Molecular Liquids, Volume 286, 110955.
- [12] Tsatsis D.E., Valta, K.A. Vlyssides A.G., Economides D.G. (2019). *Assessment of the impact of toner composition, printing processes and pulping conditions on the deinking of office waste paper*. Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 7, Issue 4, 103258.
- [13] ISO-5264. (2002). *Pulps - Laboratory beating. Part 2: PFI mill method*.