



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA
U. M. S. N. H.



“DISEÑO DE UNA COLUMNA DE FLOTACIÓN PARA
DESTINTADO DE PAPEL”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
MAESTRO EN METALURGÍA Y CIENCIAS DE LOS
MATERIALES

PRESENTA:
ING. EUNICE ESPINOZA ESTRADA
ASESOR:
DR. RAMIRO ESCUDERO GARCÍA

MORELIA, MICH.

MARZO DEL 2007



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS

**C. ING. EUNICE ESPINOZA ESTRADA,
P R E S E N T E**

Por medio de la presente, esta dirección del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tiene a bien informarle que para presentar su examen de grado de maestría en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, con la tesis titulada “DISEÑO DE UNA COLUMNA DE FLOTACIÓN PARA DESTINTADO DE PAPEL” le ha sido asignado la siguiente mesa sinodal:

9900237-0	DR. RAMIRO ESCUDERO GARCIA	(Presidente)
7402365-9	DR. FRANCISCO J. TAVERA MIRANDA	(Vocal)
0400318-7	DR. RICARDO MORALES ESTRELLA	(Vocal)
7700254-7	DR. GERARDO BARRERA CARDIEL	(Vocal)
9400258-4	DR. AMADEO SÁNCHEZ CASTILLO	(Vocal)
8303437-4	DR. ELEAZAR ARREYGUE ROCHA	(SUPLENTE)

Agradeciendo de antemano las atenciones que se sirvan prestar a la presente, aprovecho para enviarle un cordial saludo.

Morelia, Mich., Diciembre 20 del 2006.

A T E N T A M E N T E


DR. CUAUHTEMOC MALDONADO ZEPEDA
DIRECTOR
INST. DE INVEST. METALÚRGICAS





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS

**C. ING. EUNICE ESPINOZA ESTRADA
P R E S E N T E**

La dirección del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, hace de su conocimiento que le ha sido aprobada la tesis titulada:

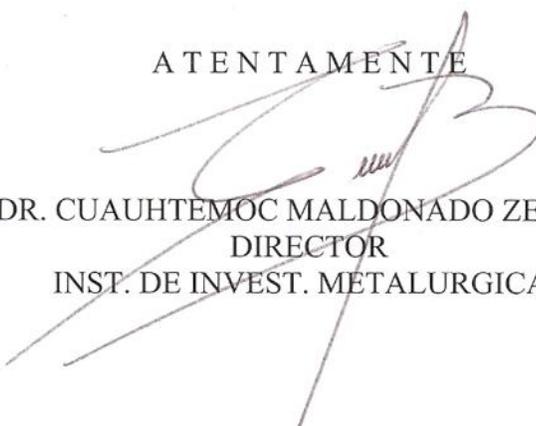
“DISEÑO DE UNA COLUMNA DE FLOTACIÓN PARA DESTINTADO DE PAPEL”

A fin de obtener el Grado de Maestro en Metalurgia y Ciencias de los Materiales. Por tal razón se le autoriza a usted la *Impresión Definitiva* de la misma, en base al oficio recibido de la mesa sinodal para realizar su examen.

Sin otro particular por el momento, me es grato saludarle muy cordialmente.

Morelia, Mich., Enero 23 del 2007.

ATENTAMENTE



DR. CUAUHTEMOC MALDONADO ZEPEDA
DIRECTOR
INST. DE INVEST. METALURGICAS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a los seres que más les debo en el mundo ya que además de darme la vida siempre me han dado su amor y su apoyo incondicional... mis padres, la C. P. Yolanda Estrada Ruíz y el Lic. Crescencio Espinosa Calderón. Gracias por ser mi ejemplo a seguir los amo mucho.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Jehová Dios por todos los beneficios que he recibido, por cada pequeño triunfo que he logrado y que me convierte en un mejor ser humano.

Gracias Dr. Ramiro Escudero García por haber confiado en mí y darme la oportunidad de participar en la realización de este trabajo, no me queda duda de que tuve la fortuna de ser asesorada por un gran investigador y un ser humano con mucho don de gente, de todo corazón muchas gracias por compartir conmigo un poco de sus grandes conocimientos.

Gracias Dr. Francisco J. Tavera Miranda por sus valiosos consejos que me ayudaron en el desarrollo de este trabajo y muchas gracias por las educativas lecciones de clase en que me instruyó así como las valiosas lecciones de vida que también compartió conmigo.

Gracias Dr. Gerardo Barrera Cardiel, Dr. Eleazar Arreygue Rocha, Dr. Ricardo Morales Estrella y Dr. Amadeo Sánchez Castillo por todo el tiempo que se tomaron en la minuciosa revisión de este trabajo para ayudarme en la mejora del mismo, así como los invaluable consejos que me dieron para desempeñar un buen trabajo científico y crecer profesionalmente.

Gracias a mis compañeros Martín Reyes, Ulises Montaña, Román Hernández, Ileri Pola y Ramón Anita que con sus mejores intenciones compartieron conmigo sus conocimientos y me ayudaron arduamente en el trabajo de laboratorio, además de convertirse en mis amigos.

Gracias a Maritza Espinoza Estrada, Antonio Espinoza Estrada y Luís Alba Gómez por darme ánimos y motivarme a seguir adelante.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
RESUMEN.....	8
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS PARTICULARES.....	9
JUSTIFICACIÓN.....	9
ALCANCES.....	10
CAPÍTULO I . INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO II . MARCO DE REFERENCIA.....	14
2.1. ANTECEDENTES SOBRE EL PAPEL.....	16
2.1.1. El reciclado del papel.....	17
2.1.1.1. Efecto del reciclado en las fibras de celulosa....	18
2.1.1.2. Problemas asociados con el uso de papel de desecho.....	18
2.1.2. Las fibras utilizadas para la producción del papel.....	19
2.1.3. La pulpa de papel.....	21
2.1.3.1. La Preparación de la pulpa.....	22
2.1.4. El Destintado de la pulpa.....	22
2.1.5. Formación de hojas.....	23
2.1.6. Caracterización de las hojas de papel.....	26
2.2. LA TINTA.....	27
2.2.1. La composición de la tinta.....	28
2.2.2. Las técnicas de impresión.....	29
2.3. LA COLUMNA DE FLOTACIÓN.....	32
2.3.1. Ventajas del uso de la columna de flotación.....	33
2.3.2. Desventajas del uso de la columna de flotación.....	33
2.3.3. Diseño.....	33
2.3.4. Operación.....	34

2.3.5. Zona de Colección.....	35
2.3.6. Zona de Limpieza.....	36
2.3.7. Velocidad superficial del aire.....	36
2.3.8. Velocidad superficial de la pulpa.....	36
2.3.9. Fracción de gas.....	37
2.3.10. El diámetro de burbuja db.....	37
2.3.11. El área superficial de burbujas sb.....	37
2.3.12. Tamaño de partícula.....	38
2.4. QUÍMICA DE LA FLOTACIÓN.....	38
2.4.1. Principio de la Flotación.....	39
2.4.2. Reactivos o Surfactantes.....	40
2.4.3. El Aceite de Pino.....	44
2.4.4. El hidroxido de sodio NaOH.....	45
CAPÍTULO III . DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	47
3.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL	47
3.2. MATERIALES Y REACTIVOS.....	49
3.2.1. Surfactante.....	49
3.2.2. Modificador de pH.....	49
3.3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....	50
3.3.1. Preparación de la pulpa de papel.....	50
3.3.2. Alimentación de la pulpa a la columna.....	50
3.4. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA COLUMNA DE FLOTACIÓN DE LABORATORIO.....	53
3.4.1. Tensión superficial del líquido (σ , dinas/cm).....	53
3.4.2. Velocidad Superficial del Aire (J_g , cm/s).....	55
3.4.3. Nivel de la interfase ($H_{[e]}$, cm).....	55
3.4.4. Densidad de la pulpa (ρ , gr/cm ³).....	55
3.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS CINÉTICOS.....	55
3.5.1. Tiempo de residencia (τ , min).....	55
3.5.2. Constante de Velocidad de Flotación (k , min ⁻¹).....	57

3.6. ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS HOJAS DE PAPEL.....	58
3.7. APLICACIÓN DE LA SUBROUTINA PARA DESTINTADO DE PAPEL.....	60
3.8. PROYECCIÓN Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE ESCALAMIENTO PARA DESTINTAR PAPEL EN UNA COLUMNA DE FLOTACIÓN DE LABORATORIO DE DIMENSIONES MAYORES.....	61
CAPÍTULO IV . RESULTADOS Y DISCUSION.....	64
4. INTRODUCCIÓN.....	64
4.1. PRIMERA ETAPA: DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	64
4.1.1. Determinación de la Tensión Superficial (σ).....	64
4.1.2. Determinación del Flujo Superficial de Aire (J_g).....	68
4.1.3. Determinación del Nivel de la interfase ($H_{[e]}$).....	70
4.1.4. Establecimiento de la Densidad de la pulpa (ρ).....	72
4.1.5. Medición del Tiempo de residencia (τ).....	73
4.1.6. Caracterización de las hojas.....	74
4.1.7. Determinación del J_g que proporciona la máxima recuperación de fibra de papel (J_g).	77
4.2. SEGUNDA ETAPA: APLICACIÓN DE LA RUTINA DE ESCALAMIENTO PARA DESTINTAR PAPEL.....	80
4.3. TERCERA ETAPA: COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS DE ESCALAMIENTO PARA DESTINTAR PAPEL EN UNA COLUMNA DE FLOTACIÓN DE MAYORES DIMENSIONES.....	80
4.3.1. Caracterización de las hojas.....	82

CAPÍTULO V . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	87
ANEXOS.....	90
Anexo A – Atributos afectados por el uso de fibras destintadas y ajustes del proceso.....	90
Anexo B – Papeles de los surfactantes en el destintado por flotación.....	92
Anexo C – Especificaciones y propiedades típicas del espumante esencia de pino grado flotación.....	93
Anexo D – Datos experimentales de la tensión superficial.....	94
Anexo E – Datos experimentales de la velocidad superficial del aire.....	95
Anexo F – Datos experimentales del nivel de la interfase.....	96
Anexo G – Datos experimentales de la densidad de la pulpa.....	97
Anexo H – Datos experimentales del tiempo de residencia.....	98
Anexo I – Datos experimentales de la máxima recuperación variando el Jg...	101
Anexo J – Datos experimentales del escalamiento.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II . MARCO DE REFERENCIA.....	14
Figura 2.1. Esquema general de la Columna de Flotación.....	35
Figura 2.2. Mecanismos involucrados en el destintado.....	40
Figura 2.3. Efecto de los surfactantes en la separación de la tinta.....	42
CAPÍTULO III . DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	47
Figura 3.1. Arreglo experimental utilizado en las primeras tres etapas del trabajo de investigación.....	48
Figura 3.2. Fotografías de algunos accesorios e instrumentos utilizados en la etapa experimental: a) burbujeador, b) bombas peristálticas, c) rotámetro, d) báscula.....	49
Figura 3.3. Secuencia de desmenuce y acondicionamiento de la fibra de papel.....	50
Figura 3.4. Evidencia de formación de la interface zona de colección/zona de espuma en las dos columnas de laboratorio.....	51
Figura 3.5. Dispositivo para medir la tensión superficial de un líquido de acuerdo al principio de formación de la gota.....	54
Figura 3.6. Celda de conductividad para determinar el tiempo de residencia de la pulpa en la zona de colección.....	56
Figura 3.7. Arreglo experimental para medir el tiempo de residencia de la pulpa en la zona de colección de la columna de laboratorio.....	57
Figura 3.8. Proceso para formar las hojas de papel con la fibra destintada.....	59
Figura 3.9. Acomodo de los aditamentos para el prensado y secado de las hojas formadas	60
Figura 3.10. Esquema experimental de la segunda Columna de Flotación de laboratorio.....	62
CAPÍTULO IV . RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
Figura 4.1. Grafica de los experimentos de los sistemas agua-espumante	

variando las concentraciones de espumante.....	65
Figura 4.2. Efecto de la tensión superficial en el diámetro de burbuja.....	65
Figura 4.3. Efecto de la tensión superficial en el área superficial de burbujas..	66
Figura 4.4. Relación entre la fracción volumétrica de gas y el flujo superficial de aire para una pulpa de papel con las condiciones anteriormente mencionadas.....	68
Figura 4.5. Cambios en el diámetro de burbuja para diferentes valores de flujo superficial de aire de los datos de la figura 4.2.....	69
Figura 4.6. Valores calculados de área superficial de burbujas para los datos de la figura 4.3.....	70
Figura 4.7. Efecto de la profundidad de la espuma en la recuperación de fibra destintada.....	71
Figura 4.8. Efecto de la densidad de la pulpa en la recuperación de fibra destintada.....	72
Figura 4.9. Determinación del tiempo de residencia de la pulpa en la zona de colección para la columna de 7.5 cm de diámetro y 270 cm de altura..	73
Figura 4.10. Hojas de papel hechos de acuerdo a la norma TAPPI T-205- OM-81 para los ensayos físicos: 1) Papel periódico, 2) Alimentación, 3) Colas, 4) Concentrado y 5) Celulosa Virgen.....	75
Figura 4.11. Fibras que aún después del destintado en la columna de flotación mantienen dentro de ellas partículas de tinta.....	77
Figura 4.12. 4.10. Grafica de los experimentos de los sistemas de pulpa de papel variando la velocidad superficial del aire contra la recuperación	78
Figura 4.13. Grafica de los diámetros de burbuja contra los Jg's.....	79
Figura 4.14. Grafica de las áreas superficiales de burbuja contra los Jg's.....	79
Figura 4.15. Grafica de los experimentos de los sistemas de pulpa de papel variando la velocidad superficial del aire contra la recuperación en la columna de flotación del escalamiento.....	81
Figura 4.16. Fotografías de las hojas de papel elaboradas con pulpa de papel procesada en la segunda columna de flotación.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO IV . RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
Tabla IV. 1. Valores de tensión superficial para concentraciones de aceite de pino en agua corriente.....	67
Tabla IV.2. Comparación de la tensión superficial de una solución agua-espumante a 25 °C y 50 °C.....	68
Tabla IV. 3. Comparación del tiempo de residencia medido con el tiempo de residencia calculado.....	74
Tabla IV. 4. Datos de la caracterización de las hojas de papel mostrados en la Figura 4.8.....	75
Tabla IV. 5. Datos de la predicción de recuperación que proporciona la rutina de escalamiento.....	80
Tabla IV .6. Comparación de los datos reales y los datos predichos por la rutina de escalamiento.....	81
Tabla IV. 7. Datos de la caracterización de las hojas de papel producto de la segunda columna de flotación.	83

RESUMEN

La importancia del reciclado del papel ha aumentado con el aumento de su demanda. Además de existir una preocupación por la protección de los bosques contra la tala de árboles, existe un interés en el reciclado ya que para la producción de papel nuevo a través de papel reciclado se requiere menor cantidad de energía y menos costos que los que se requieren al fabricar papel a través de madera.

En el reciclado, la calidad del destintado es determinante para el uso que se le dará al nuevo papel, dependiendo de esto se determina si la pulpa de papel reciclada sirve para la fabricación de papeles especializados o simplemente para la fabricación de láminas o cajas de cartón.

La columna de flotación es un equipo utilizado para la concentración de minerales, que ha estado desplazando a las celdas de flotación a causa de sus grandes ventajas.

El papel ha sido investigado en aspectos muy diversos, pero en cuanto al uso de columnas de flotación para el destintado de papel la información es muy escasa y nunca se había diseñado una columna de flotación para esta aplicación y con el fin de llevarla a escala industrial, por lo que este trabajo es el primero en realizarlo. Aplicando la rutina de escalamiento propuesta por Finch y Dobby se escaló una columna de flotación I a una columna de flotación II de mayores dimensiones, y la información obtenida es suficiente para realizar cualquier tipo de escalamiento a nivel industrial.

En este trabajo se presenta la metodología para conocer los parámetros cinéticos y de operación de la columna de flotación para destintar la pulpa de papel reciclado y posteriormente el escalamiento, como parte del trabajo se elaboraron y caracterizaron hojas de papel, y para ello se contó con el apoyo de la Industria Papelera CRISOBA S. A. de C. V. que se encuentra en la ciudad de Morelia, Michoacán, México, en donde se facilitó el acceso a los laboratorios de la misma para el uso de sus equipos y conforme a sus normas.

OBJETIVO GENERAL

- **Diseñar una columna de flotación para destintar papel con una recuperación de fibras mayor al 70%, que sustituya las celdas convencionales de flotación.**

OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener los parámetros de operación de la columna de flotación para una recuperación máxima: Velocidad superficial del aire (J_g , cm/s), fracción de gas retenido (ϵ_g , %), concentración de espumante ($[e]$, ppm), nivel de la interfase ($H[e]$, cm), densidad de la pulpa (ρ_p , gr/cm³).
- Determinar los parámetros cinéticos de operación de la columna (τ , Nd, K).
- Aplicar la rutina de escalamiento.

JUSTIFICACIÓN

El principal objetivo de este trabajo es mejorar el proceso de destintado del papel reciclado, ya que de la forma tradicional que se realizan, requieren de utilizarse en varias etapas y los equipos ocupan mucho espacio, así como también se requiere de uso de algunos químicos para completar el destintado.

Al mejorar la calidad del destintado del papel, utilizando columnas de flotación, el uso de papel reciclado podría verse incrementado, y una posible consecuencia sería la disminución de la tala de árboles.

Mediante el uso de las columnas de flotación se logra reducir la cantidad de pulpa virgen en la fabricación de papel y se aumenta el porcentaje de papel reciclado para producir papel nuevo.

ALCANCES

Además de pretender cumplir con los objetivos descritos, por el tipo de proceso utilizado para obtener el destintado de la pulpa de papel, podemos esperar que el destintado por este método vaya mas allá de los destintados realizados por los métodos ya conocidos, logrando que tenga los siguientes alcances:

- Disminuir el porcentaje de tinta final en la pulpa de papel al sustituir el uso de la celda mecánica de flotación por la columna de flotación.
- Procesar mayores cantidades de pulpa de papel para su destintado en comparación con las cantidades procesadas por medio de una celda mecánica de flotación.
- Aumentar el espacio del área de trabajo al sustituir las anchas y voluminosas celdas mecánicas de flotación por las altas y angostas columnas de flotación.
- Ahorro (por cada tonelada métrica de papel reciclado) de 14 árboles que tardan 20 años en crecer, 298 m² de bosque, 5000 Kw/h de energía, 100000 l. de agua, 0,25 Tm. de petróleo [1].
- Con todo lo anterior se conseguirá que en lugar de utilizar bajos porcentajes o nulos de papel reciclado para la elaboración de papel nuevo de alta calidad, se incremente este porcentaje y se obtenga dicho papel ahorrando: agua, energía, el uso de reactivos químicos y por lo tanto desechos químicos, tiempo, dinero y sobre todo lograría en un cierto porcentaje frenar la despiadada deforestación de nuestros bosques.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

“El papel es una materia que está continuamente presente en nuestras vidas, de hecho su consumo suele ser referenciado como un indicador del nivel de confort de muchos países. Sin embargo, el desarrollo y prosperidad de un país también puede medirse en su capacidad para degradar el medio ambiente a través de los procesos de fabricación del papel y posterior vertidos de los productos químicos. El consumo del papel sin asegurar el desarrollo sustentable concluye de residuos que no retornan al ciclo productivo. Por ello, la tasa de consumo de materiales con origen en las celulosas nos obliga a prestar una especial atención al reciclaje de estas materias.

La materia prima utilizada en la fabricación de la pasta de papel consiste principalmente en maderas, aunque también se puede utilizar algodón y paja de cereales. La utilización de maderas tiene como consecuencia la deforestación sufrida en muchos bosques primarios sin poder de restitución. Anualmente desaparecen en el mundo millones de árboles adultos que son talados con destino a las industrias de la celulosa. Estos hechos nos deben hacer reflexionar sobre la necesidad del reciclaje, y de desarrollo sostenible de los bosques como método para conseguir detener la deforestación” [1.1].

Es importante aclarar que no toda la industria papelera opera en todo el mundo sin cuidados de observar políticas de cuidado de medio ambiente. Sobre todo en los países de primer mundo no se deforesta sin reforestar. Pero no por eso deja de tener importancia el uso de papel reciclado, ya que aporta otros importantes beneficios como disminución de costos de fabricación y menor uso de químicos que al final del proceso contaminan el agua.

“Las ventajas de utilizar papel reciclado son evidentes. Los primeros beneficiados serán los bosques primarios, cuya amenaza de tala no dependerá directamente de la demanda de materia prima, sino de nuestra capacidad para concientizar a la sociedad en la recolección selectiva de papel usado. Por dependencia se beneficiaran otros sectores como la energía y los recursos de

agua, pero no menos importante es la reducción de la contaminación de las aguas así como la acumulación de vertederos, en este último caso más dañinos cuando se emiten a la atmósfera productos contaminantes resultantes de la incineración” [1.2].

“El establecimiento del reciclaje de periódico ha sido especialmente difícil: los precios del papel reciclado fluctúan drásticamente desde cero hasta alrededor de 330 dólares por tonelada métrica en un solo año (ya que antes por ser considerado basura no se le daba un valor), el material es voluminoso y su manejo costoso, y es necesario despintarlo antes de utilizarlo como materia prima para papel. Sin destintarlo, la reutilización del papel se limita a fieltro para techos, cartón y productos similares” [1.3].

Una etapa importante en el reciclado del papel es el destintado, ya que para lograr obtener una pulpa blanca se requiere la utilización de diversos químicos como el cloro, peróxido de hidrógeno, sulfato de calcio, entre otros. Con un destintado se le quita a la pulpa de papel el exceso de color y si se requiere de blanquear, al estar previamente destintada se reduce la cantidad de químicos necesarios para lograrlo, obteniendo como beneficios no solo un ahorro económico al requerir menor uso de reactivos químicos sino también una reducción de productos de desecho.

“Terminado el proceso de destintado, la pasta formada por agua y fibras vegetales es conducida a la máquina papelera, donde mediante otro complejo proceso será transformada nuevamente en papel. Esta pasta está exclusivamente formada por fibras recicladas. No debemos olvidar que este proceso se inició con papeles usados y viejos que fueron comprados por las fábricas de papel, evitando que se conviertan en desperdicios y contaminantes de las ciudades” [1.4].

“Actualmente se sabe que la flotación es uno de los procesos más eficaces para quitar partículas de tinta de la pulpa reciclada en la producción de un papel de alta calidad. Los resultados de los trabajos hechos hasta ahora hacen suponer que la alta eficiencia de la flotación y las pérdidas bajas de la fibra son algunas de las ventajas potenciales que se pueden obtener al destintar el papel en una columna de flotación” [1.5].

Es por eso que en el presente trabajo de investigación las principales actividades se orientaron al diseño de una columna de flotación para el destintado de pulpa de papel reciclado.

CAPÍTULO II

MARCO DE REFERENCIA

“Desde algunos años se está tratando de reciclar una gran variedad de productos de desecho, en particular papel, esto está motivado por dos razones, principalmente: una de carácter económico, ya que el material reciclado es una materia prima más barata que la original; y la segunda de carácter ecológico, que tiene que ver con la acumulación o eliminación de “basura” (manejo de desechos sólidos). De particular importancia es el proceso de destintado del papel recuperado, el cuál involucran varios fenómenos interfaciales, los cuales incluyen la “limpieza” de la fibra, es decir la remoción de la tinta adherida a la fibra, lo que tiene que ver con el fenómeno de detergencia, y en otro de dichos procesos tienen que ver con la dispersión de las partículas de tinta y su separación (por flotación o lavado).

Diversas industrias productoras de papel han hecho grandes esfuerzos en la búsqueda de alternativas económicamente viables para la recuperación de fibras secundarias. El objeto de esta recuperación radica en la disminución sustancial de los daños ecológicos, implicados en la manufactura del papel, y en el ahorro del capital invertido por muchas empresas para la importación y/o tratamiento de las fibras vírgenes.

El control de los desechos tóxicos involucrados en el destintado (mezcla de tintas, fibras cortas, químicos de recubrimiento y sellantes de papel), implica llevar a cabo tratamientos primarios y secundarios antes de su deposición. En razón de ello, el papel reciclado resulta costoso, aunque la materia prima pueda ser fácilmente adquirida. Por otra parte, únicamente se logra remover entre el 70 y 80% de las partículas de tinta de las fibras. En este sentido, la selección y desarrollo de las técnicas de destintado, constituyen uno de los aportes más importantes en la producción de papel” [2.1].

“El reciclaje de Papel en una incrementada conciencia medioambiental mundial esta ganando importancia. Con los rápidos desarrollos en los procesos de destintado para la reutilización de fibras secundarias, el proceso de reciclado se

ha vuelto más y más eficiente. La calidad de papel hecho de fibras secundarias se está acercando a la del papel virgen. El proceso es mucho más amistoso con el medio ambiente que el proceso de hacer papel virgen.

El destintado no es más sólo una historia de éxito del laboratorio. Hoy es una industria comercialmente próspera. Numerosas plantas han sido puestas en países como Canadá, Estados Unidos, Alemania, Suecia, entre otros. Extensa investigación continúa mejorando el proceso de destintado en universidades y otros centros de investigación.

El proceso es muy intenso químicamente y ha sido investigado exhaustivamente. Los procesos convencionales usan productos químicos que están fácilmente disponibles y son baratos. Los estándares realizados para conocer la calidad del destintado de la pulpa son los mismos para los de la pulpa de papel virgen.

Los procesos de destintado, aunque más lejos de una tecnología amigable con el ambiente de lo que son generalmente los procesos de fabricación de papel virgen, todavía utilizan algunos químicos que son perjudiciales cuando se sueltan los efluentes. Las técnicas de eliminación de aguas residuales dejan mucho que desear en la mayoría de las empresas comerciales. Debido a que los procesos generalmente son reservados, no todas las industrias están teniendo un nivel óptimo. Además, algunos resultados muy prometedores obtenidos a nivel laboratorio, si fueran incorporados en los procesos industriales, podrían ser de un gran beneficio.

La mayoría de los procesos industriales son diseñados para manejar un tipo particular de papel de deshecho. No ha habido mucho éxito comercial en el manejo de mezclas de papel. Esta comunicación es un intento de asimilar los prometedores resultados obtenidos del laboratorio y tecnologías que están actualmente en el uso industrial para diseñar un proceso óptimo de destintado para aplicaciones comerciales. El objetivo es conseguir un proceso de destintado ecológicamente amistoso y eficaz” [2.2].

“El destintado por flotación es una práctica común para remover tinta del papel de desecho, y esta siendo un proceso clave en muchas plantas recicladoras de papel. El destintado por flotación fue exitosamente introducido a la industria del

reciclado del papel en 1980, así como sus aplicaciones en remover cera, control de pegamento, además el fraccionamiento de fibra ha ganado gran interés en la investigación. Un proceso exitoso de flotación tiene tres principales subprocesos: la separación de las partículas de tinta de las fibras, la efectiva unión de las partículas de tinta a las superficies de las burbujas de aire, y el retiro de la espuma así como las partículas de tinta de las celdas de flotación. Los surfactantes pueden afectar estos subprocesos por igual, ya sea positivamente o negativamente” [2.3].

2.1. ANTECEDENTES SOBRE EL PAPEL

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

Según la tradición, el primero en fabricar papel, en el año 105 d. de la E. C., fue Cai Lun (o Tsai-lun), un eunuco de la corte Han oriental del emperador chino Hedi (o Ho Ti). El material empleado fue probablemente corteza de morera (la morera de papel pertenece a la familia de las Moráceas (*Moraceae*); es la especie *Broussonetia papyrifera*), y el papel se fabricó con un molde de tiras de bambú (Morera de papel). El papel más antiguo conservado se fabricó con trapos alrededor del año 150 d. de la E. C. Durante unos 500 años, el arte de la fabricación de papel estuvo limitado a China; en el año 610 d. de la E. C. se introdujo en Japón, y alrededor del 750 d. de la E. C. en Asia central. El papel apareció en Egipto alrededor del 800 d. de la E. C., pero no se fabricó allí hasta el 900 d. de la E. C.

El empleo del papel fue introducido en Europa por los árabes, y la primera fábrica de papel se estableció en España alrededor de 1150 d. de la E. C. A lo largo de los siglos siguientes, la técnica se extendió a la mayoría de los países

Europeos. La introducción de la imprenta de tipos móviles a mediados del siglo XV abarató enormemente la impresión de libros y supuso un gran estímulo para la fabricación de papel.

El aumento del uso del papel en los siglos XVII y XVIII llevó a una escasez de trapos, la única materia prima adecuada que conocían los papeleros europeos. Hubo numerosos intentos de introducir sustitutos, pero ninguno de ellos resultó satisfactorio comercialmente. Al mismo tiempo se trató de reducir el costo del papel mediante el desarrollo de una máquina que reemplazara el proceso de moldeo a mano en la fabricación del papel. La primera máquina efectiva fue construida en 1798 por el inventor francés Nicolás Louis Robert. La máquina de Robert fue mejorada por dos papeleros británicos, los hermanos Henry y Sealy Fourdrinier, que en 1803 crearon la primera de las máquinas que llevan su nombre. El problema de la fabricación de papel a partir de una materia prima barata se resolvió alrededor de 1840 con la introducción del proceso de trituración de madera y del primer proceso químico para fabricar y producir unos 10 años después.

Estados Unidos y Canadá son los mayores productores mundiales de papel, pulpa y productos papeleros. Finlandia, Japón, la antigua Unión Soviética y Suecia también producen cantidades significativas de pulpa de madera y papel prensa” [2.4].

2.1.1. El reciclado del papel

“La demanda por el uso del papel ha ido aumentando de manera significativa con el correr de los años. Desde las imprentas, las prensas de periódicos, pasando por las oficinas, colegios y hogares, el papel cumple un rol fundamental en nuestra vida diaria. La gran demanda ha obligado al hombre a buscar diversas formas para reutilizar el papel de desecho y cartón como pasta de papel. El proceso, llamado reciclaje, permite un ahorro considerable de energía y materia prima (madera de los bosques). Reciclar significa volver a utilizar objetos, para transformarlos en otros nuevos. Cuando los papeles reciclados llegan al lugar de transformación, son lavados con el objetivo de eliminar todas las impurezas. Los

periódicos y las revistas pueden reducirse a pasta, que se emplea para fabricar nuevos periódicos u otros productos como el cartón. El papel usado de más calidad puede aprovecharse como materia prima para fabricar papel para las imprentas. El reciclaje permite ahorrar energía y evita la contaminación” [2.5].

2.1.1.1. Efecto del reciclado en las fibras de celulosa.

“Los procesos de destintado y repulpeo afectan a la fibra en muchas formas. Primero, el destintado y el repulpeo rompen la fibra y causan la pérdida de “finas” o pequeños montones de fibra. Segundo, porque las fibras destintadas han sido previamente secadas, las fibras individuales se vuelven duras, rígidas y/o débiles. El cambio en la calidad de las fibras producido por el secado y retenido después del remojado es llamado “hornificación”. Tercero, las fibras destintadas han reducido la habilidad de enlace, porque es menos flexible que la fibra virgen y tiene menos capacidad de absorber agua durante el proceso de refinado. Los ajustes hechos por el fabricante de papel son diseñados para compensar por estas características de fibras destintadas. De acuerdo a algunos expertos, a causa de los efectos de hornificación, el rango de ajustes posible puede estar más limitado que para las especies de fibra virgen. Sin embargo, el estado de dispersión del proceso de destintado parece invertirse, al grado, la hornificación de las fibras destintadas.

La tabla en el Anexo A identifica los atributos de las fibras destintadas que pueden afectar a la hoja y contiene ejemplos de como los fabricantes de papel acomodan las diferencias en las características de las fibras vírgenes y las destintadas” [2.8].

2.1.1.2. Problemas asociados con el uso de papel de desecho

“La tensión, el coeficiente de fricción y la absorbencia del agua disminuyen por la incorporación de fibras de papel reciclado en el papel. Esto resulta en problemas alcanzando la calidad de impresión. Hay también un número máximo de veces que la fibra puede ser reciclada mientras se preserva la integridad del papel fabricado. La resistencia a la tensión del papel es una medida de cómo es la

fuerza del enlace fibra-fibra. Aparte de las propiedades perjudiciales, el reciclado del papel presenta problemas cuando corre en los rodillos en la prensa. Los químicos sobrantes se adhieren a las burbujas, estos químicos son transportados y causan la depositación de pegamentos resinosos en el material del equipo tales como los rollos de papel. Estos depósitos se pueden acumular y eventualmente aparecer sobre el papel resultando en estrepitosas motas. Numerosos estudios realizados sobre la depositación de pegamentos resinosos sugieren que los problemas se incrementan con el contenido del reciclado. También se han hecho estudios sobre la composición de los depósitos, concluyéndose que cerca del 25% eran materiales de resina y ácidos grasos.

Las rupturas de las máquinas también son un problema en las plantas de reciclado. Si el papel repele el agua en los lugares localizados, esto puede constituir puntos débiles donde el papel falla para resistir la tensión de las máquinas del papel” [2.9].

2.1.2. Las fibras utilizadas para la producción del papel

“La materia prima fundamental para fabricar papel es la celulosa. De hecho, se puede decir que el papel es una lámina constituida por un entramado tridimensional de fibras de celulosa y otras sustancias (cargas minerales, colas, almidón, colorantes, etc.), que permiten mejorar las propiedades del papel y hacerlo apto para el uso al que está destinado.

Las fibras de celulosa son un constituyente esencial de los tejidos vegetales, cuya función es la de dar resistencia a los mismos. La celulosa para la fabricación de papel se obtiene principalmente de madera (55%), de otras fibras vegetales denominadas no madereras (9%) y de papel recuperado (16%).

1. Fibras madereras. Proviene de diferentes especies de árboles y son las fibras más utilizadas por la industria papelera. La importancia de la madera como materia prima para la industria papelera radica en que contiene alrededor de un 50% de celulosa. En función del tamaño de las fibras que proporcionan las diferentes especies se puede realizar una nueva clasificación en:

- **Fibras cortas:** provienen de árboles de madera dura, como el eucalipto y algunas especies de frondosas (abedul, chopo, arce o haya), y su longitud está comprendida entre los 0.75 mm. y los 2 mm. de largo, conteniendo además un porcentaje más elevado de celulosa.
- **Fibras largas:** provienen de árboles de madera blanda, fundamentalmente coníferas como el abeto y el pino, y su longitud está comprendida entre los 3 y 5 mm., resultando la pasta de papel más resistente.

2. **Fibras no madereras.** Proviene de diferentes especies de arbustos. En los países industrializados se utilizan para producir papeles especiales, sin embargo, en otros países son la principal materia prima para la fabricación de papel, así, en China suponen el 60% de las fibras utilizadas para la producción de papel. Estas fibras presentan un gran potencial de desarrollo para sustituir a las fibras madereras. Las especies más utilizadas son:

- **Algodón:** las fibras tienen una longitud superior a los 12 mm. y se utilizan en la fabricación de papeles finos de escritura.
- **Cáñamo:** las fibras tienen una longitud superior a los 5 mm. y proceden de cordeles viejos y otros desperdicios. Sirven como materia prima para la producción de papel de fumar.
- **Lino:** las fibras tienen una longitud entre 6 y 60 mm. y se usan para fabricar papel moneda
- **Paja de cereales:** estas fibras se utilizan en la producción de envases para huevos, botes y tubos de papel.

3. **Fibras recuperadas.** Las fibras presentes en el papel y cartón viejo pueden volver a utilizarse para fabricar papel y cartón de nuevo. A través del proceso de reciclado se pueden recuperar la mayoría de las fibras de celulosa que contiene el papel. No obstante, este proceso no se puede repetir indefinidamente ya que las fibras recuperadas pierden resistencia en el proceso, siendo necesario aportar según la resistencia del papel que se quiera fabricar, una proporción de fibras vírgenes al proceso de reciclado, ya sea procedentes de madera o de otras fibras vegetales” [2.10].

2.1.3. La pulpa de papel

“Los tipos de pulpa se clasifican según su proceso de producción. Son clasificadas por especie original: madera blanda o madera dura y por el proceso de producción usado: químico o mecánico y blanqueado o sin blanquear.

1. PULPA MECÁNICA

- **Pulpa de piedra de madera triturada:** moliendo de madera en fibras relativamente cortas. Esta pulpa se utiliza principalmente en papel prensa y en los papeles que contienen madera.
- **Pulpa termomecánica (TMP):** producido en un proceso termomecánico donde las partículas de madera son ablandadas por el vapor antes de entrar en un refinador presurizado. La TMP tiene principalmente los mismos usos finales que la pulpa de piedra de madera triturada.

2. PULPAS SEMIQUÍMICAS

La pulpa semiquímica es producida de una manera similar a la TMP (pulpa termomecánica), solamente de las partículas de madera químicamente se tratan antes de entrar en el refinador. Esta pulpa tiene características satisfechas a la fabricación del tejido fino. Se utiliza en los grados de impresión y escritura.

3. PULPAS QUÍMICAS

- **Pulpa del sulfito:** producido cocinando las virutas de madera en un recipiente de presión en presencia del licor del bisulfito. Gama de los usos finales del papel prensa, papeles de la impresión y de escritura, tejido fino y papeles sanitarios. La pulpa se puede blanquear si se desea o no.
- **Pulpa del sulfato (o Kraft):** la pulpa se produce cocinando las virutas de madera en recipientes de presión en presencia de un licor del hidróxido del sodio. La pulpa se puede blanquear si se desea o no. Los usos finales son extensos, la pulpa blanqueada se usa particularmente para los papeles gráficos, tablero del tejido fino y del cartón, los embalajes, los papeles del saco y del bolso, los sobres y otros papeles sin blanquear de la especialidad.

4. PULPAS DE DESTINTADO

Son las pulpas elaboradas con papel recuperado del cual se han quitado la tinta y otros contaminantes” [2.11].

2.1.3.1. La Preparación de la pulpa

“La preparación de la pulpa con papel usado consiste en la disgregación de las hojas de papel en fibras vegetales individuales.

En el caso de la industria papelera, el papel usado llega en grandes fardos amarrados con alambre; luego de serles retirado el alambre, los fardos transitan a través de una cinta transportadora hacia un pulper (o mezclador industrial), que es una batea de disgregación parecida a una gigantesca juguera, donde los fardos de papel son mezclados con agua, para lo cual se utiliza una gran hélice que agita la mezcla, hasta que las hojas de papel se convierten en una pasta de consistencia similar a la de una crema.

Un metro cúbico de dicha pasta esta conformado por un 3% a un 16% de fibras vegetales y sólidos, y el resto es agua. Este porcentaje de fibras, sólidos y agua, se denomina consistencia de la mezcla.

Las impurezas más pesadas, típicamente metales, se depositan en el fondo del pulper, desde donde son extraídas a través de placas agujereadas y separadas del proceso de reciclaje.

En el caso de hojas de papel usado de más difícil disgregación, el agua del pulper es calentada a temperaturas de 65°C, agregándosele productos químicos, jabones y otros agentes” [2.6].

2.1.4. El Destintado de la pulpa

“La aplicación de productos químicos se realiza principalmente para eliminar las tintas contenidas en la pasta.

En la operación de destintado, la tinta es removida de las fibras vegetales por una combinación de acciones mecánicas y químicas. El sistema más usado es el de flotación, que consiste en separar la tinta de las fibras útiles, luego impulsarla

hacia la superficie de una celda de flotación y posteriormente retirarla mediante un barredor móvil que recorre y barre dicha superficie.

La separación de la tinta de las fibras vegetales útiles se consigue mediante la adición de agentes químicos, que van agrupando la tinta en partículas de mayor tamaño, las cuales quedan suspendidas en la mezcla, pero separadas de las fibras vegetales. En seguida se inyecta el aire para crear burbujas que atrapan esas partículas. Las burbujas con tinta suben hasta la superficie del agua, formándose una capa de espuma parecida a una nata de color oscuro; esta nata es retirada desde la superficie de la celda de flotación mediante el barredor móvil, para luego ser conducida por tubería hasta una planta de tratamiento de efluentes” [2.6].

2.1.5. Formación de hojas de papel

“Para elaboración de Hojas de prueba se toma como base a la norma TAPPI T-205-OM-81.

MATERIAL:

- 1 Cubeta de 10 Lt
- 1 Jarra de 1000 ml
- 1 Desfibrador
- 1 Formador de Hojas
- Hojas de papel secante
- 1 Prensa automática para hojas
- 2 Portadiscos con sus discos de acero inoxidable
- 1 Secador de hojas
- 1 Balanza analítica
- Bolsas de plástico con cierre hermético

MUESTREO: Salida de pulpa del depurador lavada y depurada.

PROCEDIMIENTO:

A) PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

1. A la celulosa muestreada se le determina el por ciento de consistencia, ecuación (2.1).

$$\% \text{ Consistencia} = \frac{W_{\text{seco}} (100)}{W_{\text{Húmedo}}} \quad (2.1)$$

Donde: W = Peso en gramos de la muestra

2. Sobre la base de la consistencia obtenida, calcular los gramos húmedos (ecuación 2.2) que se requieren para elaborar 5 hojas de 60 gr/m² cada una.

$$\text{Gramos Húmedos de Pulpa} = \frac{(100)(10.77)}{(\% \text{ de Consistencia})} \quad (2.2)$$

Donde: Diámetro de la hoja formada = 214 mm

Radio de la hoja formada = 107 mm = 0.107 m

Área de la hoja formada = $(\pi) (r^2) = 0.0359 \text{ m}^2$

Gramaje requerido por hoja = 60 gr/m²

Peso seco de cada hoja = 2.154 gr

Número de hojas a elaborar = 5

Pulpa seca requerida = (2.154 gr) (5) = 10.77 gr

3. Los gramos húmedos de pulpa calculados, se colocan en el desfibrador conteniendo 2 litros de agua y desfibrar hasta completar 2777 r. p. m.
4. Después de que la muestra ha sido desfibrada, pasarla a una cubeta y aforar 5 litros con agua. Homogenizar perfectamente y tomar 1 Lt para formar cada hoja.
5. Limpiar perfectamente la base de formación del formador de hojas y adicionar al cilindro un 40% de su capacidad de agua (aproximadamente 5 Lt).
6. Adicionar el litro de muestra al formador de hojas, agitar perfectamente durante 6 segundos y aplicar el vacío lentamente al formador hasta que toda el agua haya sido drenada y la hoja formada.
7. Después de que la hoja esta formada, colocarle encima una hoja de papel secante y un disco metálico de acero inoxidable. Presionar para que la hoja se pegue en el papel secante.
8. Quitar las hojas del formador, colocar un disco encima de la hoja formada e identifíquela con el número de digestión que proviene.
9. Repetir el mismo procedimiento para cada hoja hasta completar la formación de todas las hojas.

B) PRENSADO DE LAS HOJAS

Posteriormente ya que todas las hojas han sido elaboradas, deberemos darle un prensado y secado, para esto, se utilizará la prensa automática de la siguiente manera:

10. Colocar primeramente en la parte inferior de la zona de prensado dos hojas de papel secante, además de una hoja de papel secante intermedia entre cada disco para aumentar el secado.
11. Coloque la tapa de la prensa encima de los discos ya colocados y atornille perfectamente, poniendo el botón accionador de presión en el numero 1, el cual durará 5 minutos con una presión de 50 lb/pulg² (3.5 kg/cm²).
12. Al terminar el tiempo, quite la tapa y coloque al revés todos los discos; ponga de nuevo la tapa y cambie el botón accionador al numero 2 el cual durará 2 minutos a la presión de 50 lb/pulg² (3.5 kg/cm²).

C) SECADO DE LAS HOJAS

13. Luego de que las hojas han sido prensadas, deberemos quitar las hojas de la prensa, separando únicamente el papel secante, y las hojas formadas quedaran en los discos metálicos. Estos se colocan en un Portadiscos debiendo quedar bien ajustados para evitar que las hojas se arruguen con el secado.
14. Meter el Portadiscos al secador de hojas durante 3 horas a una temperatura de 70-80°C aproximadamente.
15. Finalizando esto, se separan las hojas del Portadiscos y se revisa que la formación haya sido homogénea. Si no es así, se elimina la hoja.
16. Posteriormente se pesa cada hoja en la balanza analítica debiendo tener un gramaje de 60 gr/m² (peso seco de cada hoja 2.154 gr), se calcula con la ecuación (2.3) y pudiendo estar en un rango de $\pm 5.0 \%$, es decir, de 57 a 63 gr/m² (2.0463 a 2.2617 gr). Si no cumple esta condición, se eliminará la hoja.

$$\text{Gramaje} = \frac{\text{Peso de la Hoja de Prueba Formada}}{\text{Área de la Hoja de Prueba Formada}} \quad (2.3)$$

Donde: W = Peso en gr de la muestra

A = Área en m² de la muestra

17. Después de pesadas las hojas, se colocan en bolsas de plástico y se cierran herméticamente para mantener la humedad en la hoja y no afecte esto al hacer pruebas físico mecánicas” [2.13].

2.1.6. Caracterización de las hojas de papel

Una vez elaboradas las hojas de papel se les realizan las siguientes pruebas:

- **Peso.** Aunque determinar el peso no es una prueba como tal, el peso es un dato importante de la hoja ya que la norma TAPPI T-205-OM-81 indica que una hoja de papel debe pesar 60 gr/m^2 , si pesa menos significa que la consistencia de la pulpa era menor de lo requerida y por el contrario si pesa más. La medición se realiza en una báscula en gramos.
- **Calibre.** El calibre se mide en unidades de micrómetros (μm) y al igual que el peso no es una prueba como tal sin embargo si se requiere de un equipo para determinarlo y su conocimiento es de gran importancia ya que al medir el calibre en varios puntos de la hoja que no es más que el grosor de la misma nos podemos dar cuenta de que tan bien elaborada esta la hoja ya que si el calibre de un lado de la hoja varia mucho al calibre de otro lado de la misma hoja, eso indica que la hoja no esta bien hecha, también el calibre de alguna manera esta relacionado con las demás propiedades de las hojas ya que por ejemplo si una hoja tiene bajas propiedades y bajo calibre, su baja resistencia puede deberse a que la hoja fue elaborada con menos de los gramos húmedos de pulpa requeridos, aunque esto no es algo absoluto como en nuestro caso para la muestra del concentrado donde la consistencia es la adecuada pero por estar acompañada de tinta la cual al elaborar la hoja se filtra por la malla del formador de hojas y como resultado se forma una hoja de bajo calibre.
- **Tensión.** La resistencia a la tensión del papel se mide en unidades de kilogramos (kg) en un equipo en donde se colocan tiras de papel de 1 cm de ancho y se sujetan por sus dos extremos, al poner en marcha el equipo este comienza a tensar el papel hasta que se rompe, es conveniente realizar varias mediciones para sacar un promedio, aunque por lo general el resultado es el mismo para la misma hoja.

- **Rasgado.** La resistencia al rasgado del papel se mide en unidades de gramo sobre pie (gr/ft) en un equipo donde se colocan cuatro cuadritos de papel de 4 cm por 4 cm. Al poner en acción el equipo este rasgará el papel por la mitad como cuando uno rompe un papel por la mitad con las manos. La resistencia al rasgado determina la fuerza promedio requerida para rasgar una hoja.
- **Opacidad y Blancura.** Ambas pruebas las realiza el mismo equipo, la opacidad no se da en unidades sino en porcentaje (%) y la blancura se da en unidades de fotovol donde el valor para el papel blanco es de alrededor del 85. Las pruebas aquí son muy sencillas ya que solo se requiere repegar la hoja de papel a una ventanilla donde se realiza la medición. Para el caso de la opacidad el papel se dobla en ocho o se utilizan ocho hojitas juntas, para el caso de la blancura solo se requiere de una.
- **Composición.** Para la elaboración del papel con pulpa virgen se indica desde el inicio que porcentaje de cada tipo de fibra se debe de utilizar según el tipo de papel que se vaya a fabricar, pero cuando no se conoce con que tipo de fibra se elaboró el papel o en que porcentaje lo que se hace es colocar un trocito miniatura de papel en un tubo de ensaye con agua y se agita vigorosamente hasta que este se desfibrá completamente, enseguida se vierte un poquito de dicho líquido sobre un portaobjetos el cuál se coloca sobre una parrilla para evaporarle el agua, ya seco se le vierte una gota de Graff “C” Stain que es un reactivo a base de yodo y sirve para colorear las fibras y poderlas observar en un microscopio óptico, ya en el microscopio se observan los tipos de fibras y se saca el porcentaje de cada una a simple vista. Cada tipo de fibra se distingue por el color y el tamaño, aunque es más la experiencia lo que ayuda a distinguir las.

2.2. LA TINTA

A pesar de que existe poca información a cerca de las tintas utilizadas en la impresión de papel, el conocimiento de estas es de gran importancia ya que dependiendo del tipo de compuestos químicos que estas contengan será el tipo de procedimiento que se deberá seguir incluso ya sea que se requiera del uso de colectores especiales o específicos. La información dice que se deberá utilizar

distintos tipos de flotación simultáneamente para quitar tanto las tintas hidrofóbicas como las hidrofílicas, pero eso será en el caso en el que se tengan diferentes mezclas de papeles en los que a su vez provengan de procesos diferentes de impresión en los que se hayan utilizado diferentes tipos de tintas. Para nuestro caso, el que se utilizó fue el papel prensa más conocido como papel periódico por lo general utiliza solo un tipo de tinta la cual es hidrofóbica, por lo tanto no requerimos procedimientos adicionales para la extracción de algún otro tipo de tinta.

“En años recientes, sin embargo, las fórmulas de las tintas han llegado a ser más y más complejas e involucran un incremento en el uso de una amplia variedad de resinas sintéticas y plastificantes. Muchas de las nuevas fórmulas incorporan nuevos pigmentos, tinturas, y toners que son difíciles de remover por el destintado convencional acuoso con químicos” [2.14].

2.2.1. La composición de la tinta

“El desarrollo de nuevos materiales de empaque ha traído aparejada toda una tecnología de impresión para ser aplicada sobre los mismos. Al mismo tiempo un servicio cada vez más demandado como la publicidad ha aportado su grano de arena al desenvolvimiento de la invención de Guttenberg, que en nuestros días cuenta con un amplísimo espectro de tecnologías. A pesar de que se han sustituido muchas de las tintas usadas en la antigüedad, existen como consecuencia de lo mencionado tintas de diversas características pero que a efectos del destintado pueden agruparse en tres tipos:

- Tintas hidrofílicas
- Tintas hidrofóbicas
- Tintas sólidas

En una suspensión acuosa de fibras de celulosa, las partículas de tinta de distinto tipo, tendrán un comportamiento diferenciado, por lo que podrán ser mayormente removidas en distintas etapas del proceso, y afectarán en caso de no serlo, distintas características de la calidad del papel obtenido. De lo anterior se desprende la gran importancia que tiene la clasificación del papel de desecho a

éste respecto. Un proyecto que apunte a la remoción de un único tipo de tinta, estará condenado a fracasar, y la idea de un sistema integral que tenga la posibilidad de tratar varios tipos de impreso parece ser la que brinda mejores horizontes” [2.12].

Las tintas también se clasifican de acuerdo a sus usos en:

- Tintas para escritura
- Tintas para imprenta
- Tintas para multcopista
- Tintas para fines especiales [2.15].

Más adelante en los procesos de impresión se da más información sobre la composición química de las tintas.

2.2.2. Las técnicas de impresión

“Las técnicas de impresión, son procesos utilizados para reproducir textos o imágenes, como la imprenta, litografía, tipografía, flexografía, grabado y serigrafía. Todas estas técnicas utilizan mecanismos sencillos que consisten en aplicar sustancias colorantes a un soporte, ya sea de papel o plástico, para realizar múltiples reproducciones” [2.16].

Las técnicas de impresión se clasifican a continuación:

1. LITOGRAFÍA
 - Offset
 - Litografía offset moderna
2. IMPRESIÓN EN RELIEVE
 - Tipografía
 - Planchas de copia
 - Planchas de fotopolímeros
 - Impresión flexográfica
3. GRABADO
4. SERIGRAFÍA
5. PROCESOS DE IMPRESIÓN ELECTRÓNICA
 - Impresión electrofotográfica

- Impresión por chorro de tinta
- Impresión por microcápsulas
- Impresión por sublimación térmica y transferencia de ceras

La explicación de cómo funciona cada una de las técnicas de impresión sería muy extensa de explicar en el presente trabajo, por lo que solo mencionamos brevemente las más comunes:

- **Impresión Electrofotográfica**

“La impresión electrofotográfica es uno de los procesos de impresión más prometedores de la tecnología de hoy. Reduce espacio, y se usa fácilmente, es rápido y económico. El toner es principalmente un copolímero de estireno y acrilato metílico, mientras el portador está hecho de hierro, acero o ferrita. Cuando estos se mezclan, la fricción que pertenece a ellos produce carga entre un donante y un receptor para producir imágenes” [2.17].

- **Impresión a chorro de tinta o Ink-jet printing**

“Una imagen digital del documento original, guardado en una cinta magnética o un disco, es trasladada a una imagen impresa por la proyección controlada de gotitas de tinta en el papel. La tinta debe tener una viscosidad extremadamente baja, debe secar rápidamente después de ser depositada sobre el papel” [2.7].

“La resina en la tinta del chorro de tinta, es principalmente un polímero, el cual requiere un buen manejo entre la máquina de impresión y el voltaje de la tinta de chorro de tinta. La impresión resina-pigmento representa un reto especial para la impresión chorro de tinta, debido al hecho de que ninguna resina o pigmentos son solubles en agua o solventes orgánicos. Estos sistemas de dos fases, son sometidos a problemas con alta viscosidad, tamaño de partícula inestable, aglomeración, inestabilidad de corte y separación de fases” [2.17].

- **Procesos digitales**

“Los sistemas de creación de imagen digital han surgido como una alternativa a la tradicional fotografía con haluro de plata. Debido al rápido crecimiento de la industria de la cámara digital, la tecnología y la investigación han cambiado de una base química a aquella de una base electrónica. Desde que la presentación del sistema digital está ampliamente determinada por el equipo físico y el software,

una gran cantidad de investigación esta enfocándose ahora en un componente individual. Ellas son reproducción de color, análisis de calidad de imagen, y ecuaciones matemáticas, por nombrar solo un poco” [2.17].

- **Xerografía**

“Las partículas de toner son la “tinta” en este caso. Las partículas consisten de pigmentos coloreados, tal como carbón negro, en un aglutinante de resina termoplástica, y pueden ser toners líquidos o sólidos. En cualquier caso, la tinta se funde en la superficie del papel al calentarla” [2.7].

- **Impresión láser**

“La impresión láser forma una imagen con la ayuda de un rayo láser. El principio: un rayo láser forma una imagen latente sobre el tambor cargado por neutralizar la carga sobre las áreas donde no hay imagen. Las partículas de toner aplicadas al tambor adherido a las áreas de imágenes cargadas forman tinta xerografica” [2.7].

- **Impresión flexográfica**

“El tipo de tinta utilizada en flexografía es tradicionalmente en base agua, con propiedades muy diferentes, por ejemplo, las mayoritariamente utilizadas tintas offset. Las finas partículas de tintas flexo no son eficientemente eliminadas durante el proceso de flotación, ya que a condiciones alcalinas se dispersan y establecen una suspensión muy estable. Es precisamente en las fábricas de papel que utilizan procesos de reciclado pensados para el tratamiento de tintas hidrofóbicas, y por lo tanto tratamientos alcalinos, donde la presencia de tintas flexo en la materia prima supone el mayor problema” [2.18].

“Los principales tipos de proceso de impresión pueden clasificarse según la base de la tinta que utilizan:

Tintas de base oleosa

- Impresión offset
- Impresión gravure
- Impresión letterpress

Tintas de base sintética

- Impresión electrostática

- Impresión termográfica
- Impresión UV

La fotocopiadora revolucionó las técnicas de impresión, dejó atrás al sucio mimeógrafo y facilitó los duplicados, además de lograr una nitidez increíble para un sistema de copiado “no profesional”. Básicamente se trata de un sistema de impresión con tinta sólida electrostáticamente sensible (Toner), que se adhiere al papel por atracción coulombiana y luego es fijada por calor al mismo. La tinta es del tipo plástico y al fundirse logra una adherencia tal que le confiere a la impresión la nitidez y permanencia características.

Debido a las fuertes interacciones que existen entre las partículas de tinta y las fibras de papel, los procesos convencionales de lavado y flotación no son eficaces en su separación del papel. No obstante lo anterior, las investigaciones en pos de mejorar el reciclado de los impresos láser no cesan.

Teniendo en cuenta tanto intereses económicos como sociales, dos hechos se contraponen: la tendencia del mundo a reciclar papel y el creciente uso de tecnologías láser y fotocopiadoras. El objeto no es plantear la necesidad de una disminución en el uso de métodos xerográficos sino dejar en claro que la separación previa de papeles impresos por éste método adquiere la condición de imprescindible” [2.12].

2.3. LA COLUMNA DE FLOTACIÓN

“La columna de flotación fue patentada en los 60’s por Boutin y Tremblay (patentes canadienses 680, 576 y 694, 547). Wheeler (1966) [2.26] y Boutin y Wheeler (1967) [2.27] dieron descripciones avanzadas de la columna y trabajo de prueba. Este diseño es llamado algunas veces la columna ‘Canadiense’; dado el número de sus variaciones, podría ser ahora llamada la columna ‘convencional’.

Otros diseños que soportan el nombre de la columna incluyen: la columna leeds (Dell y Jenkins, 1976 [2.28]; la patente para esta actualmente antecede a la columna canadiense), la columna empacada (Yang, 1988) [2.29], la columna de flotación (Zipperian y Svensson, 1988) [2.30], la columna hidroquímica (Schneider y Van Weert, 1988) [2.31], la columna desarrollada por Jameson (1988) [2.32] y

los varios diseños descritos en una reciente publicación Rusa (Tyurnikova y Naumov, 1981) [2.33].

El énfasis sobre la columna canadiense refleja el hecho de que hay más publicaciones sobre estas columnas y hay más en operación en las plantas que ningún otro simple diseño” [2.19].

2.3.1. Ventajas del uso de la columna de flotación

“Las columnas de flotación tienen un gran campo de aplicaciones debido a muchos factores: obtención de buenos resultados en el proceso, la posibilidad de beneficiar las partículas finas y gruesas, alta selectividad en la separación debido al uso de la mayor eficiencia de los procesos que ocurren en la espuma, es un proceso sencillo de controlar, consumo bajo de energía, flotación efectiva de las pesadas pulpas cargadas y así una disminución en la capacidad de la celda y dosis de reactivo, la falta de partículas en movimiento, requiere poco espacio y un diseño simple. La alta eficiencia de la columna de flotación aunada a una reducción en el tiempo del proceso, una disminución en el número de etapas y en el volumen de la carga en circulación en el circuito de flotación y, como resultado de esto, un incremento en la consistencia y fiabilidad de operaciones” [2.20].

2.3.2. Desventajas del uso de la columna de flotación

“Una de las desventajas es la posibilidad de crear varias condiciones aerohidrodinámicas para la flotación en una celda. La baja intensidad del mezclado de la pulpa da como resultado un incremento en la selectividad de la flotación de partículas finas. Esto se debe a un decrecimiento brusco en la partícula entrampada y una reducción en la dispersión de la distribución de la celda del tiempo de residencia de la partícula” [2.20].

2.3.3. Diseño

“La columna se muestra esquemáticamente en la figura 2.1. Las medidas comerciales son generalmente de 9-15 m de altura y 0.5 a 3.0 m de diámetro (la columna más grande sin deflectores conectados es de 2.5 m, la columna más

grande con deflectores es de 3.0 m). La sección transversal puede ser cuadrada (diseño suministrado por la Compañía de Columnas de Flotación de Canadá) o circular (favorecida en la mayoría de las unidades 'hecho en casa'). El lado de la columna cuadrada o el diámetro de la columna circular son usados para diseñar el tamaño de la columna.

A parte de la forma dos características que distinguen a la columna de otros equipos de flotación son los sistemas de generación de burbujas y el uso de agua de lavado.

La generación de burbujas es realizada para ambos directamente a través de burbujeadores internos o después del contacto externo del gas con agua o pulpa (mencionado aquí como un burbujeador externo). Los burbujeadores internos están hechos de perforados tubos revestidos generalmente en tela (por ejemplo filtro de tela) o caucho perforado. Un ejemplo de un burbujeador externo es aquel desarrollado por el U. S. Bureau of mines (McKay et al., 1988) [2.34].

El agua de lavado es adicionada dentro de la espuma, generalmente de un arreglo de tubos localizados justo debajo del labio de desborde" [2.19].

2.3.4. Operación

“La alimentación de la pulpa entra aproximadamente a un tercio hacia abajo desde el tope y desciende una vez más a una nube creciente de generación de burbujas generadas por el burbujeador. Las burbujas colectan las partículas flotables, por lo tanto es la descripción de la zona de colección (figura 2.1). Esta zona es equivalente a la pulpa (o lodo líquido) o zona de recuperación en una celda convencional. Las partículas colectadas son transferidas a la espuma estabilizada por el agua de lavado. El primordial papel del agua de lavado es limpiar la espuma de partículas entrampadas en el agua cruzando con las burbujas de la zona de colección. Por lo tanto, la zona de espuma es también llamada zona de limpieza. (El término zona de lavado a sido utilizado también para referirse a la zona entre la alimentación y la interfase pulpa-espuma (Wheeler, 1983) [2.35]).

En general la presentación de la columna de flotación es influenciada por la interacción entre la zona de colección y la zona de limpieza. Un término importante en este aspecto es el quedarse atrás de la espuma, la fracción de los sólidos entrando a la espuma los cuales son regresados a la zona de colección. Esto mejora la separación pero disminuye la capacidad por unidad de volumen de la columna [2.19].

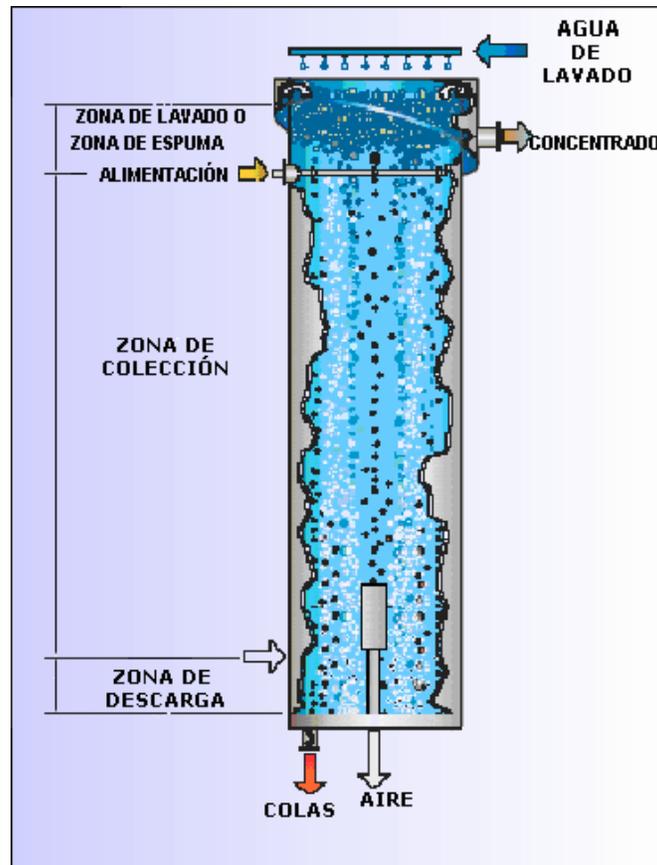


Figura 2.1. Esquema general de la Columna de Flotación [2.37].

2.3.5. Zona de Colección

Es la zona donde las partículas hidrofóbicas tienen la oportunidad de apegarse a las burbujas para ser separadas del resto y salir, el proceso se da de la siguiente manera: “Una partícula mineral en una columna de flotación es colectada por una burbuja de aire a través de uno de dos procesos: 1) colisión burbuja-partícula seguida por una unión debido a la naturaleza hidrofóbica de la superficie del mineral; o 2) la adhesión a la burbuja de la partícula sin el límite de la capa y el

levantamiento de la burbuja. (En una columna, la precipitación de las burbujas de aire sobre superficies hidrofóbicas no es un factor significativo.) Una característica clave de la columna de flotación es que el recubrimiento de la partícula por la adhesión a la burbuja puede ser virtualmente eliminado” [2.19].

2.3.6. Zona de Limpieza

Esta es la zona formada por la espuma, la cual esta formada a su vez por burbujas que llevan en sus paredes a las partículas hidrofóbicas que se desean separar. Para esta zona se utiliza generalmente agua de lavado para limpiar a la espuma de posibles partículas no hidrofóbicas o hidrofílicas entrampadas entre las burbujas. Para el caso de este trabajo no se utilizó el agua de lavado ya que en la industria para el destintado del papel no se utiliza y como el propósito del trabajo es realizar un escalamiento del proceso, es por ello que para apegarnos lo más posible a las condiciones reales de la industria se ha desarrollado este estudio para que funcione con dichas condiciones.

2.3.7. Velocidad superficial del aire

“La velocidad superficial del gas J_g es la velocidad del flujo volumétrico del gas dividido por el área de la sección transversal de la columna, ecuación 2.4.

$$J_g = \frac{Q_g}{A_c} \quad (2.4)$$

Las unidades son, por ejemplo, (cm³/s de gas) / (cm² área de la columna), o unidades de velocidad, cm/s. La velocidad superficial es conveniente porque puede ser comparada para columnas de diferente diámetro. El J_g es notablemente consistente para diferentes tamaños de columnas” [2.19].

2.3.8. Velocidad superficial de la pulpa

“Por analogía, las velocidades superficiales son introducidas para otros flujos, dando la definición general en la ecuación (2.5), donde i puede ser el bias del agua (B) o agua de lavado (W) o pulpa de las colas (T), etc.” [2.19].

$$J_i = \frac{Q_i}{A_c} \quad (2.5)$$

2.3.9. Fracción de gas

“Gas retenido es la fracción de gas en una mezcla líquido-gas o pulpa-gas. La magnitud del gas retenido es un indicio de las condiciones hidrodinámicas de la zona de colección” [2.19].

2.3.10. El diámetro de burbuja db

Existe un modelo matemático para calcular el diámetro de burbuja el cual fue desarrollado por Finch y Lobby (1989) [2.19] al cual le llaman Drift Flux. Para medir el db por este método “La técnica consiste en sustituir repetidamente los valores estimados de db en la ecuación (2.6)

$$U_{sg} = \frac{gd_b^2 \rho_l (1 - \epsilon_g)^{m-1}}{18 \mu_l (1 + 0.15 \text{Re}_{bs}^{0.687})} \quad (2.6)$$

hasta que el U_{sg} de la ecuación (2.6) se hace igual al U_{sg} medido de la ecuación (2.7).

$$U_{sg} = \frac{J_g}{\epsilon_g} \pm \frac{J_l}{(1 - \epsilon_g)} \quad (2.7)$$

El db calculado esta dentro del $\pm 15\%$ del db medido. Esta técnica también ha sido aplicada a datos de celdas mecánicas (Manqiu and Finch, 1988a) [2.36].

El éxito de estimar el db por este método es porque alivia la dificultad de las mediciones fotográficas del db” [2.19].

2.3.11. El área superficial de burbujas

El área superficial de las burbujas es un valor importante ya que a mayor área superficial de burbujas es mayor la probabilidad de las partículas de tinta para adherirse a las paredes de las burbujas. La fórmula con la que se puede calcular esta en función del diámetro de burbuja y de la velocidad superficial del aire es la que se muestra en la ecuación (2.8).

$$S_b = \frac{6J_g}{d_b} \quad (2.8)$$

2.3.12. Tamaño de partícula

“El tamaño de las partículas de tinta para ser removido es la base fundamental para la elección de la técnica de destintado adecuada. Limpiadores centrífugos y de pantalla remueven las partículas grandes de tinta ($>100 \mu\text{m}$). **El lavado** es más eficiente en remover las partículas de tinta más pequeñas ($<10 \mu\text{m}$). **La flotación** remueve las partículas que son demasiado pequeñas para ser removidas por pantallas y limpiadores y todavía son demasiado grandes para ser removidas por lavado ($20\text{-}150 \mu\text{m}$)” [2.7].

“Si el tamaño de la partícula es demasiado pequeño, la inercia de las partículas es insignificante y tiende al siguiente razonamiento alrededor de la burbuja de aire. Esto conduce a una menor probabilidad de colisión con las burbujas de aire y por lo tanto, las partículas tienen menos oportunidad de ser capturadas. Generalmente, las partículas de tinta presentes en la pulpa de papel son de una distribución de partícula muy amplia. Por ejemplo, los rangos del tamaño de partículas de tinta desde $10 \mu\text{m}$ a $600 \mu\text{m}$. Finas partículas con un diámetro más pequeño de $30 \mu\text{m}$ son particularmente resistentes a la flotación. Por lo tanto, algún proceso de coagulación o floculación iniciado en la celda de flotación puede mejorar la eficiencia del destintado por flotación. Esto se ha observado por muchos años con el uso de ácidos grasos y iones de calcio.

La tinta y la celulosa, difieren significativamente en la hidrofobicidad: las fibras de celulosa son hidrofílicas sin embargo, las partículas de tinta base aceite son hidrofóbicas” [2.22].

2.4. QUÍMICA DE LA FLOTACIÓN

“La flotación es uno de los métodos primarios usados para destintar pulpa de papel impreso. Funciona colectando partículas de tinta dispersas en burbujas de aire y entraparlas en una capa de espuma. El espectro de los químicos agregados al circuito de la flotación incluye colectores de partículas de tinta (ácidos grasos o alcoholes etoxicarbolatos), colector activador (iones de calcio), agentes espumantes (surfactantes no iónicos), y reguladores de pH (NaOH o Na_2CO_3). Hoy en el campo del procesamiento de los minerales, no es poco común

probar los nuevos químicos para tratar de mejorar los procesos de flotación. Se siguen los mismos pasos para los procesos del papel reciclado, los cuales usan similares técnicas de flotación. Sin embargo hay, una significativa diferencia entre los materiales que se procesan en la tecnología de procesamiento de minerales y el destintado de papel que tiene algunas diferencias en los enfoques de la flotación” [2.22].

“La eficiencia de la flotación de las partículas de tinta esta en función de dos factores importantes, concretamente:

1. colisión entre las burbujas de aire y las partículas de tinta, y
2. unión de las partículas de tinta a las crecientes burbujas de gas.

La probabilidad de la colisión depende del tamaño de partícula” [2.23]. A pH alcalino los grupos carboxilo y alcohol de las fibras de celulosa se ionizan haciendo ésta más hidrofílica y aumentado su carga negativa.

2.4.1. Principio de la Flotación

“La flotación es un proceso de separación ampliamente utilizado en el enriquecimiento de minerales, y desde hace algunos años en el tratamiento de aguas residuales. La flotación es una técnica que involucra fenómenos variados entre los cuales se destaca el control de la hidrofobación / hidrofiliación de una superficie de partículas dispersas en fase acuosa mediante la adsorción de un surfactante.

La clave del proceso es la obtención de una mojabilidad diferente para las partículas de tinta y para las fibras. En el caso del destintado es un proceso sencillo por la naturaleza diferente de la tinta (una sustancia apolar) y de la fibra celulósica (un polímero con muchos sitios polares).

A fin de obtener una mojabilidad diferente para las partículas de tinta y para las fibras en la flotación, se realizan ajustes del tipo físico-químico-mecánico, esto consiste básicamente en la adición de varios aditivos con funciones específicas, entre los cuales se destacan los surfactantes como los más importantes. Luego, conformada una dispersión de fibras y tinta en una fase acuosa, se hace pasar por esta un flujo de gas (generalmente aire), de modo tal que las partículas de tinta

(hidrofobadas) se adhieran a las burbujas de aire, las cuales las arrastran en su movimiento ascendente, mientras que las fibras (hidrofilizadas) permanecen en la dispersión (figura 2.2). Las burbujas cargadas de partículas de tinta terminan por formar una espuma que se colecta por un vertedero. Finalmente, una vez colapsada la espuma y recuperadas las fibras, se comprueba el rendimiento del proceso. Este rendimiento se expresa como la relación del peso de la fibra destintada respecto a la fibra impresa al sistema, lo cual representa una de las variables más importantes del proceso” [2.1].

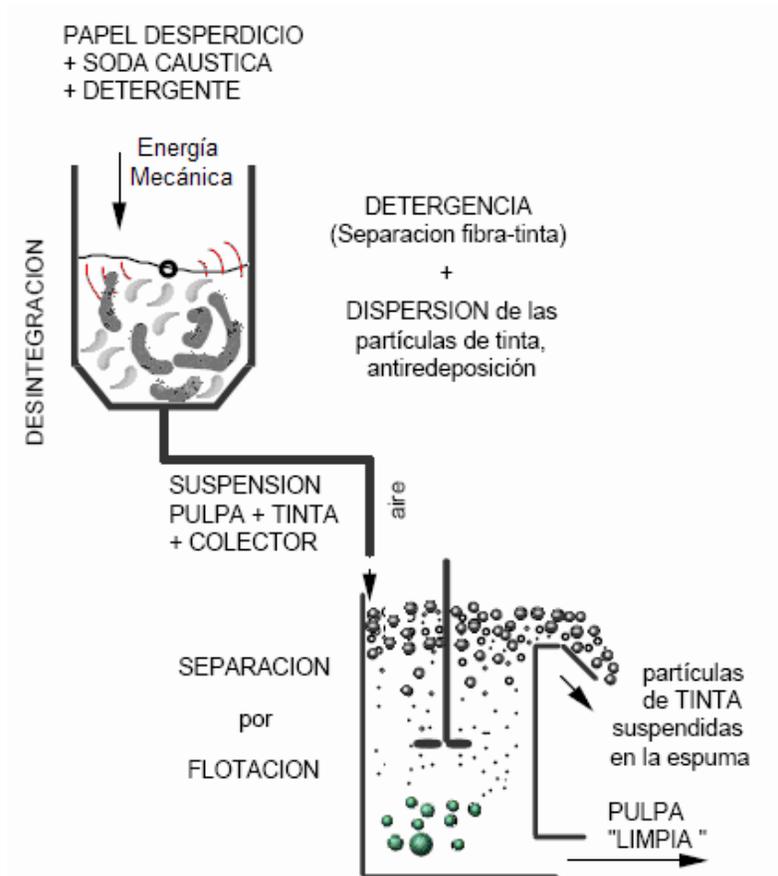


Figura 2.2. Mecanismos involucrados en el destintado.

2.4.2. Reactivos o Surfactantes

“Los reactivos generalmente se conocen como los colectores, los depresores, los activadores, los modificadores del pH y los espumantes” [2.24].

“Estas sustancias permiten controlar las propiedades del sistema y según el caso y el uso, se clasifican como jabón, detergente, tensoactivo, emulsionante, dispersante, espumante, humectante, hidrofobante, inhibidor de corrosión, etc. [2.1]”.

Hablando en términos más específicos, “Surfactante es la abreviación de agentes activos de la superficie (surface active agents), los químicos deben tener un grupo hidrofílico (amante del líquido) e hidrofóbico (odiante del líquido). Para una solución acuosa, estas son generalmente llamadas grupos hidrofílicos e hidrofóbicos. De esta amplia definición, algunos químicos que tienen ambos una porción hidrofílica y una porción hidrofóbica más o menos deben tener actividad superficial (reduciendo la energía superficial del líquido o sólido) y puede ser llamado en general surfactante. Por esta definición, desespumantes, dispersantes, agentes espumantes, y colectores utilizados en destintado por flotación son todos surfactantes. Los surfactantes de un proveedor químico comercial son frecuentemente mezclados de muy diferentes agentes funcionales de superficies activas y superficies no activas, tal como el hidróxido de sodio, el silicato de sodio, etc. [2.3]”.

“En resumen, la función de los surfactantes o sistema surfactante es liberar las partículas de tinta de las fibras, estabilizar las partículas liberadas, agregar las partículas dispersadas y/o modificar las propiedades de la superficie de las partículas de tinta liberadas, y en general mejorar la separación de tinta de la línea de flotación (figura 2.3). Aunque los dispersantes y los colectores pueden no ser necesarios para algunas pulpas, un espumante debe utilizarse para obtener una capa de espuma estable para retirar las partículas de tinta. Aunque los surfactantes utilizados en el destintado pueden ser clasificados como espumantes, dispersantes, colectores, y desespumantes, la mayoría de los surfactantes frecuentemente juegan papeles múltiples (por ejemplo, los dispersantes pueden generar espumas en general), eso también puede afectar positiva o negativamente el proceso del destintado.

Por lo tanto, los proveedores de surfactantes deben tomar todos estos aspectos en consideración en la fórmula del surfactante. El Anexo B muestra los impactos posibles que pueden tener los surfactantes en el destintado por flotación” [2.3].

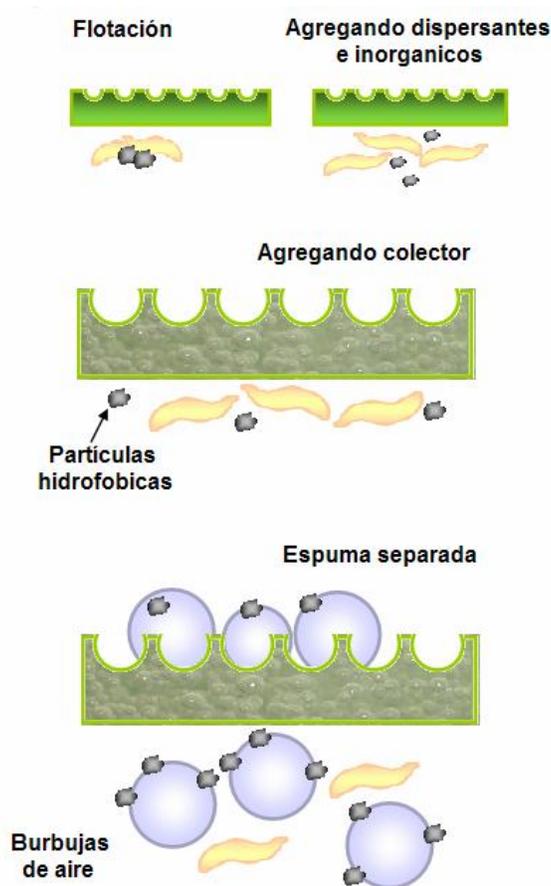


Figura 2.3. Efecto de los surfactantes en la separación de la tinta [2.2].

“Las condiciones de destintado, tal como equipo, dureza de agua, pH, y temperatura, son diferentes en cada planta recicladora de papel. Como resultado, una fórmula de surfactante que funciona bien en una planta puede no funcionar en otra planta” [2.3].

La información que existe sobre los surfactantes sería muy extensa de explicar en el presente trabajo, por lo que solo mencionamos de manera breve la forma en la que actúan:

- **Agentes de Dispersión o Agentes de Anti-Redeposición**

“Los dispersantes ayudan en la separación de las partículas de tinta de la superficie de la fibra y previenen la redeposición de las partículas de tinta separadas sobre las fibras durante el destintado por flotación. Surfactantes no iónicos, tal como los alcoholes lineales etoxilatos, etoxilato alifáticos, etoxilatos

ácidos grasos, oxido-oligoetileno alquilo éter, y oxido polietileno alquilo éter, son ampliamente utilizados en las plantas de destintado como dispersantes porque pueden funcionar independientemente, no son afectados por la dureza del agua, y sus propiedades hidrofílicas-hidrofóbicas pueden ser fácilmente controlados por la síntesis química.

Los dispersantes pueden bajar la tensión superficial de la pulpa media, así el incremento de mojabilidad de la tinta-fibra cubierta y el aumento de la separación tinta-fibra.

- **Colector**

“Como lo dice su nombre, la función de un colector es agregar partículas muy pequeñas de tinta que han sido liberadas de las fibras por la acción del pulpeo. Las partículas son entonces más eficientemente removidas por la elevación de las burbujas de aire inyectadas por la unidad de flotación. El rango del tamaño óptimo de partícula para el destintado por flotación es de 10 a 100 μm . Sin embargo, antes de que los colectores sean agregados, la mayoría de las partículas de tinta son mucho más pequeñas de 10 μm .

Los colectores pueden estar hechos de materiales que existen naturalmente, tal como los jabones de ácidos grasos, sintéticos tales como los copolímeros del oxido polietileno y oxido polipropileno, y mezclas tales como ácidos grasos etoxilatos. Es siempre necesario balancear los efectos de un colector con aquellos de un dispersante en el destintado por flotación, si se usa un dispersante” [2.3].

- **Espumante**

“La función del espumante es generar una capa de espuma en la parte superior de la celda de flotación para la separación de la tinta. Un espumante debe de ser utilizado para obtener una capa estable de espuma para remover las partículas de espuma.

Los espumantes no iónicos son ampliamente utilizados como espumantes en el destintado por flotación porque tienen excelente espumabilidad y función independientemente de la dureza del agua. Un sistema de ácido graso podría no solamente servir como colector sino también como espumante y dispersante en la

operación del destintado por flotación solo cuando hay tres ácidos grasos en la suspensión de la pulpa.

Desafortunadamente, el aumento en la concentración de la espuma en la suspensión de la pulpa aumenta la adsorción del surfactante por las partículas de tinta, resultando en una reducción de la hidrofobicidad de la superficie de las partículas de tinta y por lo tanto bajo retiro de la tinta. Por lo tanto, hay una concentración óptima de espumante para la eficiencia de la separación de la tinta” [2.3].

- **Desespumante o Antiespumante**

“Porque la estabilidad de la espuma, estructura de la espuma, y dinámica de la espuma son críticas para el retiro de la tinta y las pérdidas de tinta y agua, algunas veces el desespumante es agregado en una pulpa durante el pulpeo de la flotación para controlar la estabilidad de la espuma y la estructura. También, adicionando un desespumante se puede reprimir la formación de espumas durante el proceso de fabricación del papel” [2.3].

2.4.3. El Aceite de Pino

El aceite de pino es un agente espumante, el cual se prefirió en lugar de cualquier otro espumante, ya que se sabe el que aceite de pino tarda más tiempo en volatilizarse que los demás espumantes.

- **Información general**

“La esencia de pino grado flotación constituye un tipo especial de Aceite de pino como agente espumante para procesos de flotación, particularmente para el beneficio de minerales de sulfuro no metálicos, obteniendo principalmente de aceites extraídos de la madera del pino; es una mezcla de terpenos, predominantemente alcoholes terpenicos con pequeñas cantidades de terpenos relacionados.

La esencia de pino grado flotación produce un fuerte espúmeo de buen volumen, textura satisfactoria y una estabilidad excelente de la vida de la celda de flotación. Mientras que sea usado normalmente como un espumante, es también un efectivo colector para minerales.

- **Principales Características**

La esencia de pino grado flotación es un fuerte espumante, proporciona excelente estabilidad de vida de la celda de flotación, posee excelentes propiedades de mojado, bajo punto de congelamiento y pérdidas bajas por volatilidad. Es claro, de color amarillo dorado a naranja-café, con un definido olor a pino natural; volatilidad media, muy baja solubilidad en agua, altamente soluble en los solventes orgánicos más comunes.

- **Usos Típicos**

La esencia de pino grado flotación es un espumante altamente efectivo para la flotación de zinc, cobre, níquel, hierro y minerales de sulfuros de plomo. Es usado en la flotación de oro y otros minerales nativos y es un excelente espumante para el beneficio de minerales no metálicos, tales como carbón, mica, cuarzo, grafito, arena silica, feldspatos, roca fosfórica y talco. Es especialmente usado donde un espumante altamente mineralizado es requerido a causa de que la espuma puede soportar y permanecer con concentraciones pesadas de minerales mientras es removida del circuito de concentración.

Aunque es normalmente usado como un espumante, la esencia de pino grado flotación posee propiedades de colección para sulfuros, talco, molibdenita, grafito y algunos carbones” [2.25]. Las especificaciones y las propiedades típicas de este espumante se encuentran en el Anexo C.

2.4.4. El hidróxido de sodio NaOH

“El hidróxido de sodio (sosa cáustica), es usado en el proceso de destintado para ajustar el pH a la región alcalina y saponificar o hidrolizar las resinas de las tintas. En medio alcalino se produce el hinchamiento de la fibra. El pH usado en el pulpeo es de 9.5 – 11.0, las fibras adquieren mayor flexibilidad. La adición de sosa cáustica causa un amarillamiento (en pulpas para papel que se derivan de madera), el cual es más pronunciado en el caso de papeles con alto contenido de fibra mecánica” [2.1].

El hidróxido de sodio es utilizado como dispersantes para separar las partículas de tinta de las fibras de celulosa y al mismo tiempo funciona como colector, es decir une a las partículas pequeñas de tinta para formar partículas de tinta más grandes y que sean más fáciles de remover, y también hace a las fibras de celulosa más hidrofóbicas, beneficiando así su separación [2.3].

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este trabajo el desarrollo experimental se divide en cuatro etapas: a).- Construcción de una columna de flotación de laboratorio, b).- determinación de las condiciones adecuadas de operación de la columna para el destintado de papel, c).- determinación de los parámetros cinéticos de la columna y aplicación de la rutina de escalamiento, y d).- la proyección del diseño a una columna de laboratorio de mayor diámetro y la comparación entre lo calculado y lo obtenido experimentalmente. A continuación se describe el procedimiento experimental en cada una de las etapas.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El trabajo completo requirió del uso de dos columnas de flotación; la columna I para experimentalmente determinar los parámetros de operación, y la columna II para comprobar la rutina de escalamiento. La columna I se reconstruyó y acondicionó mejorándola de cómo era originalmente, la columna II que estaba en perfecto estado no requirió de hacerle ninguna mejora y se utilizó tal y como estaba.

La columna I esta hecha de material acrílico transparente de 7.5 cm. de diámetro interno y 270 cm. de altura. A lo largo de la columna se le practicaron tres orificios, en donde se colocaron mangueras para medir la presión hidrostática. Estos orificios se localizaron a 12, 78 y 102 cm. desde la base de la columna.

El punto de alimentación se colocó a 169 cm. de altura de la base de la columna. La Figura 3.1 muestra esquemáticamente la columna empleada en las primeras tres etapas de la experimentación. Se instaló en la base de la columna un burbujeador del tipo rígido poroso fabricado de acero inoxidable (Moot Industrial) con un diámetro nominal de poro de 2 μm . El burbujeador cilíndrico tiene un diámetro externo de 2.5 cm y 5 cm de altura (Área superficial= 39.27 cm^2).

En el fondo de la columna a un lado del burbujeador se adaptó una salida para la corriente de colas o desechos de 2 cm. de diámetro. Los flujos en las corrientes

de alimentación y colas fueron manipulados mediante dos bombas peristálticas (Masterflex easy load y Masterflex console drive).

El aire comprimido alimentado a la columna se manipuló y midió a través de un rotámetro de esfera (Gilmont Instruments) con capacidad de 0 a 5 L/min. El acondicionamiento de la pulpa se hizo en un tanque con deflectores y agitandola con un mezclador de 1 HP marca Siemens.

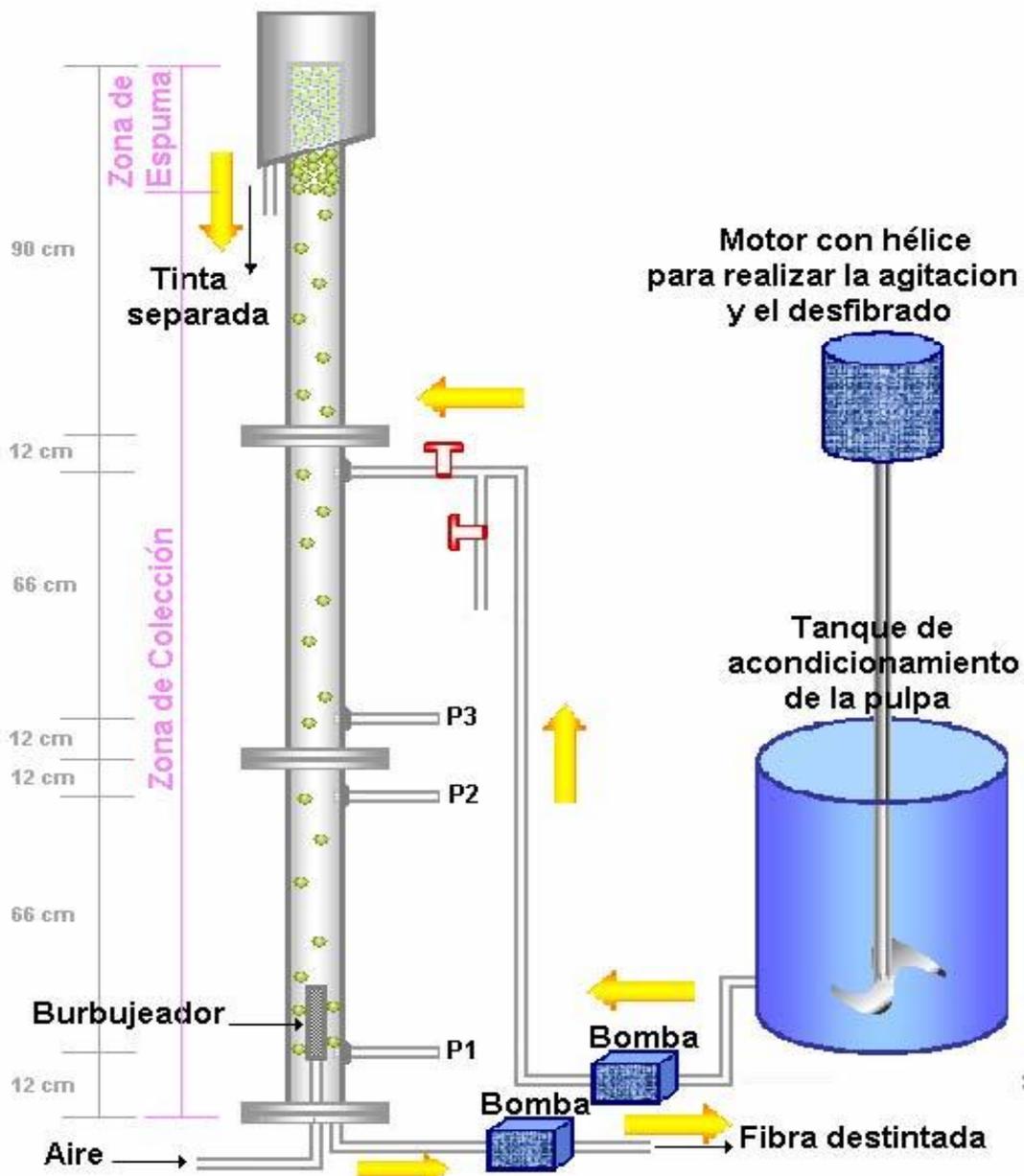


Figura 3.1. Arreglo experimental utilizado en las primeras tres etapas del trabajo de investigación.

La temperatura de la pulpa se midió permanentemente mediante un termómetro de vidrio con la ampolla de mercurio. La temperatura de la pulpa se manipuló usando una resistencia eléctrica comercial dentro del tanque. El pH de la pulpa se midió con un transductor de pH Horiba.

En la Figura 3.2 se observa el burbujeador, bombas peristálticas, rotámetro y la báscula utilizada durante el procesamiento de muestras para cuantificar la eficiencia del proceso de destintado.

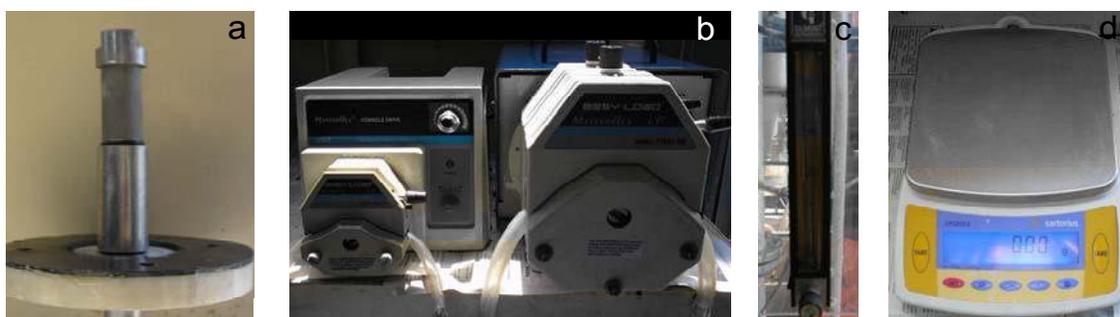


Figura 3.2. Fotografías de algunos accesorios e instrumentos utilizados en la etapa experimental: a) burbujeador, b) bombas peristálticas, c) rotámetro, d) báscula.

3.2. MATERIALES Y REACTIVOS

3.2.1. Surfactante

Para modificar la tensión superficial del líquido se empleó aceite de pino, suministrado por ALKEMIN S.A. DE C.V. DE S.R.L. Las características químicas de este surfactante se muestran en el Anexo C.

3.2.2. Modificador de pH

De acuerdo al procedimiento propuesto en la literatura [3.1] y en la práctica, el pH de la pulpa debe ajustarse a valores entre 8 y 9. Se utiliza hidróxido de sodio (NaOH) como reactivo regulador del pH; el cuál, además de lo anterior, facilita la acción de desmenuzamiento de la fibra de papel.

3.3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

3.3.1. Preparación de la pulpa de papel

Teniendo el tanque de acondicionamiento limpio y listo se prepara la pulpa de la siguiente manera:

- Se corta el papel en tamaños de 2 cm² aproximadamente.
- Se coloca la cantidad de agua requerida en el tanque de acondicionamiento.
- Se pesa la cantidad de papel necesario para preparar la pulpa de papel con la densidad que se desee.
- Se coloca el papel en el tanque de acondicionamiento.
- Se mide el pH de la solución, se le adiciona el NaOH hasta alcanzar un pH de 8. Se coloca la resistencia dentro del tanque de acondicionamiento.
- Se inicia la agitación de la pulpa (Figura 3.3).
- Se agita durante aproximadamente 1 hr que es el tiempo que se requiere en este caso para moler y desfibrar adecuadamente al papel, así como elevar la temperatura hasta los 50 °C.



Figura 3.3. Secuencia de desmenuzamiento y acondicionamiento de la fibra de papel.

3.3.2. Alimentación de la pulpa a la columna

Una vez preparada la pulpa se le adiciona el espumante, que en este caso es aceite de pino, se fija el flujo de aire y se activa la bomba de alimentación.

Inmediatamente al iniciar la alimentación, se activa la bomba de colas, esto permite que a la vez que se va llenando la columna se va formando y controlando la espuma, hasta alcanzar el nivel deseado.



INTERFASE EN LA
COLUMNA I DE FLOTACIÓN



INTERFASE EN LA
COLUMNA II DE FLOTACIÓN

Figura 3.4. Evidencia de formación de la interfase zona de colección/zona de espuma en las dos columnas de laboratorio.

Una vez que la columna está prácticamente llena, se fija la posición de la interfase zona de colección/zona de espuma manipulando el flujo de alimentación hasta lograr el establecimiento de la interfase. Una vez logrado el control de esta interfase (Figura 3.4) se continúa con los experimentos de acuerdo al siguiente orden:

- Se esperan dos tiempos de residencia antes de realizar mediciones o tomar muestras, esto con el fin de lograr el mayor grado de homogenización de la pulpa dentro de la columna de flotación.
- Se toman las mediciones de presión en los manómetros de la columna manualmente.
- Se extraen las muestras de los diferentes flujos en el siguiente orden:
 1. En un recipiente de 2 lt de capacidad se toma la muestra del concentrado a la vez que se le mide el tiempo transcurrido durante la toma de la muestra

esto con el fin de realizar el cálculo de la velocidad de dicho flujo, enseguida se pesa y se anota el dato.

2. De igual manera se repite el mismo procedimiento pero en este caso para tomar la muestra del flujo de colas.
 3. Para tomar la muestra de la alimentación se cierra la llave del flujo que da entrada a la columna de flotación y simultáneamente se abre la llave que desvía el flujo para poder tomar la muestra, la cuál se toma de manera similar a los casos anteriores. El flujo de la alimentación se deja al último porque al tomar dicha muestra, el nivel de la interfase y llenado de la columna baja y si se hiciera antes que los otros flujos estos alterarían principalmente el flujo del concentrado.
- Si se requiere cambiar las condiciones de operación de la columna de flotación y realizar otra medición u otra toma de muestras, se realiza el cambio y después de volver a estabilizar la interfase y haber transcurrido dos tiempos de residencia se vuelven a tomar las mediciones y/o las muestras.
 - Una vez que se obtienen las mediciones y muestras requeridas se apagan las bombas y el motor del tanque de acondicionamiento y se deja expulsar la pulpa de papel que esta dentro de la columna de flotación al tanque de acondicionamiento, una vez vacía la columna de flotación se lava con agua y se purga para limpiar igualmente las mangueras, la pulpa del tanque de acondicionamiento se filtra y el papel separado se deja secar o se le puede transformar o darle el uso que se desee.
 - Las muestras son filtradas y se les separa el papel dejándolo secar. Una vez seca, la muestra es pesada y se calcula el flujo de papel seco y la recuperación de fibra en cada uno de los flujos, también se puede calcular la consistencia de la pulpa, dato que sirve para calcular los gramos húmedos de pulpa de papel para elaborar las hojas de papel.

3.4. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA COLUMNA DE FLOTACIÓN DE LABORATORIO

En la primera etapa de experimentos se determinaron los mejores parámetros operativos como tensión superficial del líquido, velocidad superficial del aire, nivel de la interfase y densidad de la pulpa. La columna que se utilizó y la disposición de los equipos utilizados en la experimentación, se esquematiza en la figura 3.1. Inicialmente se fijó la interfase a 20 cm del borde superior de la columna y una densidad de pulpa de 0.7 gr/cm^3 en este caso facilitó el transporte de los fluidos a través de las mangueras.

3.4.1. Tensión superficial del líquido (σ , dinas/cm)

La tensión superficial del agua se modificó con la adición del espumante aceite de pino. El comportamiento clásico de los espumantes es de disminuir la tensión superficial del líquido. De acuerdo al límite de solubilidad para cada surfactante se observa un mínimo en el valor de la tensión superficial, donde adiciones posteriores de espumante no se reflejan en valores menores de tensión superficial.

Para conocer la cantidad de espumante a la cuál se alcanza la mayor disminución de la tensión superficial se experimentó en la columna de flotación con sistemas aire-agua, variando la concentración de surfactante. Para cada adición de espumante se varió el flujo superficial de aire alimentado a la columna. Se realizaron mediciones de presión con las cuáles se calcularon valores de fracción volumétrica de gas y éstos se graficaron con respecto a la velocidad superficial del aire (J_g , cm/s). Los experimentos se realizaron para 0, 20, 40 y 60 ppm de espumante. Los resultados experimentales se incluyen en el Anexo D.

Experimentalmente la tensión superficial del líquido se determinó por medio de un dispositivo de laboratorio el cuál funciona bajo el principio de formación de la gota por caída de presión [3.2], dicho instrumento se ilustra en la Figura 3.5.

El principio de formación de gota por caída de presión para medir la tensión superficial de un líquido, consiste en depositar el líquido motivo de la determinación, en el tubo de la parte izquierda del instrumento. En el extremo

opuesto se localiza un segmento de pipeta con una llave dosificadora que permite la salida del líquido y la formación de la gota. La formación de esta gota depende de una cierta caída de presión que es registrada en la columna de líquido (normalmente hexano), y que se relaciona con la tensión superficial de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta p_1}{\sigma_1} = \frac{\Delta p_2}{\sigma_2} \quad (3.1)$$

donde Δp_1 y Δp_2 son las caídas de presión al momento de determinar la tensión superficial del agua sin y con espumante, respectivamente. La tensión superficial del agua sin espumante está representada por σ_1 , mientras que σ_2 sería el valor de la tensión superficial que se desea cuantificar.



Figura 3.5. Dispositivo para medir la tensión superficial de un líquido de acuerdo al principio de formación de la gota.

La ecuación 3.1 supone una relación lineal entre la caída de presión y la tensión superficial del líquido.

Teniendo en cuenta que la tensión superficial del sistema agua-espumante puede variar de temperatura ambiente (25°C) a 50°C que es la temperatura a la que se destinta la pulpa de papel, se realizaron las mediciones de tensión

superficial a las dos temperaturas para ver su efecto, los resultados se muestran en el capítulo IV.

3.4.2. Velocidad Superficial del Aire (J_g , cm/s)

Una vez calculada la cantidad de espumante requerida, se llevaron acabo los experimentos para determinar la velocidad superficial de aire que resultará en la mayor recuperación de fibra de papel destintada, de acuerdo a las otras características de la dispersión (d_b y S_b), pero ahora en un sistema de pulpa de papel, con los valores mencionados anteriormente de nivel de interfase 20 cm del tope y densidad de la pulpa de 0.7 gr/cm^3 . Los resultados de dichos experimentos se encuentran en el Anexo E.

3.4.3. Nivel de la interfase ($H_{[e]}$, cm)

En esta etapa ya se conocían los valores adecuados de concentración de espumante y velocidad superficial del aire. Se experimentó con la misma densidad de la pulpa y lo que se varió fue la altura de la interfase en 10, 20, 30, 40 y 50 cm desde el tope de la columna de flotación. Los resultados de dichos experimentos se encuentran en el Anexo F.

3.4.4. Densidad de la pulpa (ρ , gr/cm^3)

Se estableció la mejor densidad de pulpa en base al rendimiento de la columna, por lo que en esta serie de experimentos se emplearon los datos antes establecidos de flujo superficial de aire, tensión superficial y nivel de interfase. La densidad de pulpa se varió en 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 y 1.1 gr/cm^3 . Los resultados de dichos experimentos se encuentran en el Anexo G.

3.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS CINÉTICOS

3.5.1. Tiempo de residencia (τ , min)

Aunque el tiempo de residencia de las partículas se puede calcular mediante la fórmula:

$$\tau = \frac{\text{Volumen de la zona de colección (cm}^3\text{)}}{\text{Caudal volumétrico o de agua de salida (cm}^3\text{/s)}} \quad (3.2)$$

y dar un valor aproximado al valor real, para el caso específico del escalamiento de la columna de flotación, es fundamental tener el valor real, para introducirlo en la rutina de escalamiento. Por esa razón para determinar el tiempo de residencia real se construyó una celda de conductividad como la de la Figura 3.6. Esta se coloca en la salida de las colas en la columna de flotación, se introduce una solución salina que hace la función de trazador y para ser detectada por la celda de conductividad y así determinar el tiempo de residencia real, como se muestra en la Figura 3.7.

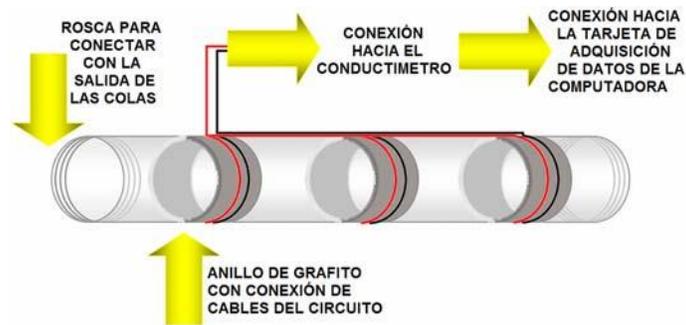


Figura 3.6. Celda de conductividad para determinar el tiempo de residencia de la pulpa en la zona de colección.

La solución salina se introdujo a través de la alimentación, ésta es detectada en las colas con la celda de conductividad utilizando como instrumento un conductivímetro. La señal generada en la celda es digitalizada con una tarjeta tipo DAQ y guardada en una computadora para su posterior análisis.. Para esta serie de experimentos no se hizo necesario tomar muestras de la pulpa de papel ni de presión, los resultados experimentales se muestran en el Anexo H.

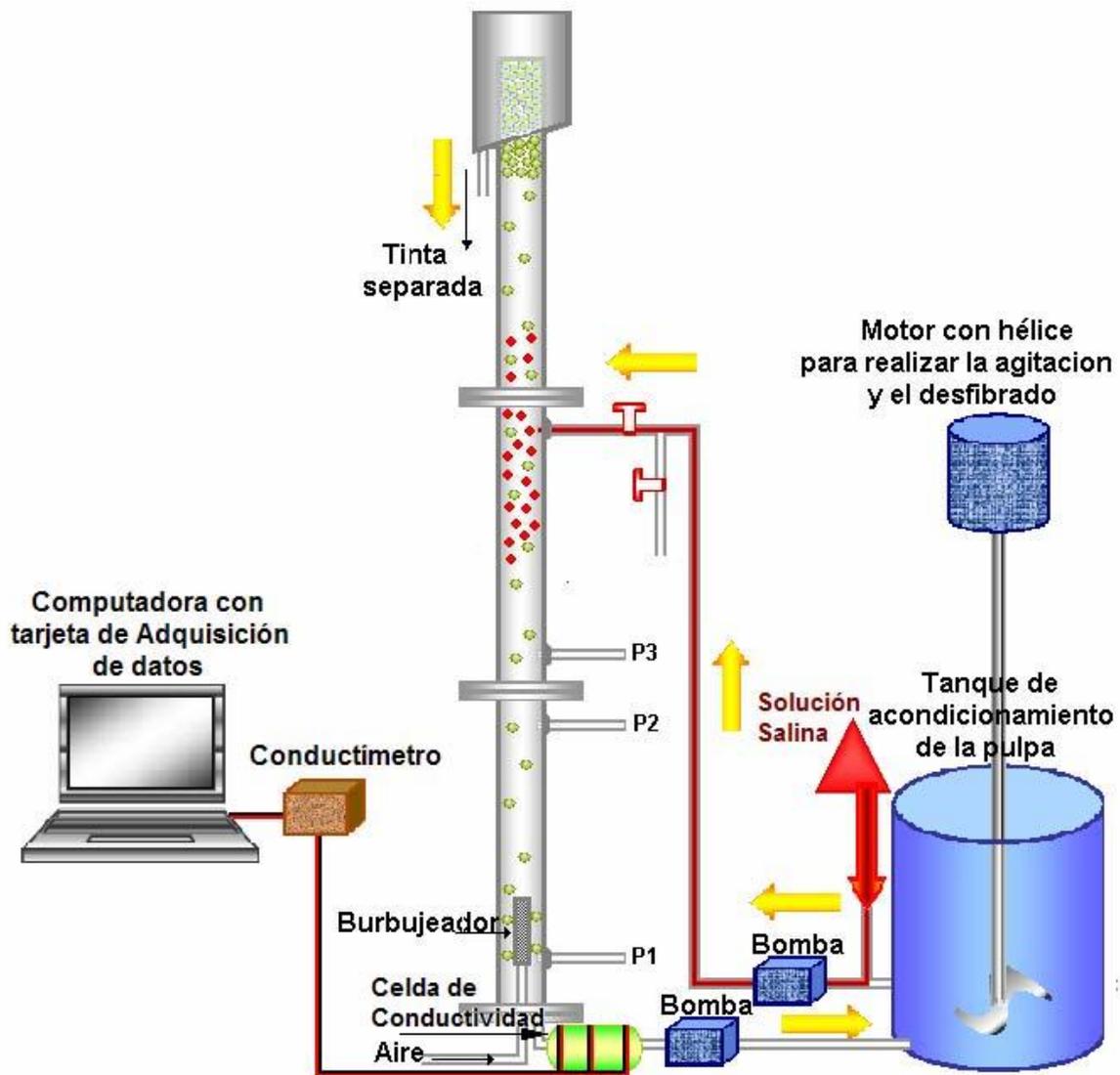


Figura 3.7.- Arreglo experimental para medir el tiempo de residencia de la pulpa en la zona de colección de la columna de laboratorio.

3.5.2. Constante de Velocidad de Flotación (k , min^{-1})

La constante de velocidad de flotación al igual que el tiempo de residencia es un dato necesario en la rutina de escalamiento, el cuál se calculó dentro de la rutina a partir de la fórmula de la recuperación cuando se tiene mezclado perfecto [3.3]:

$$R = \frac{k\tau}{1 + k\tau} \Rightarrow k = \frac{R}{\tau - R\tau} \quad (3.3)$$

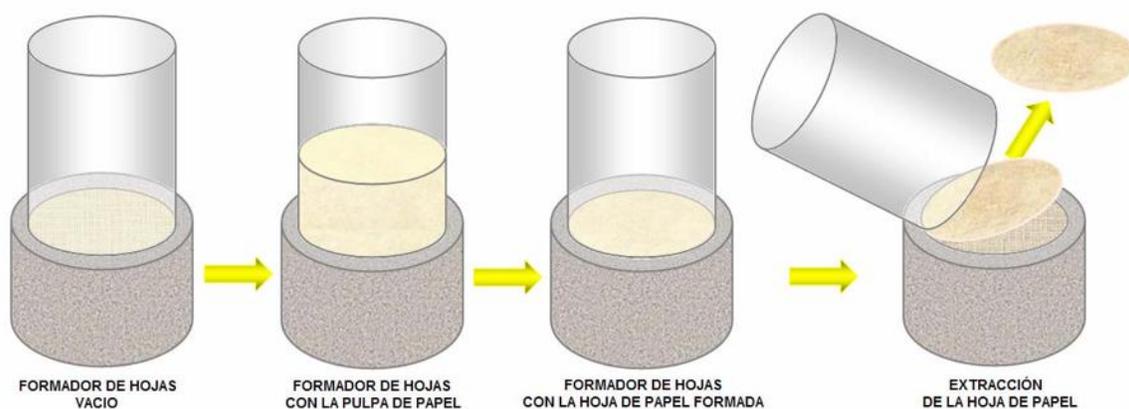
3.6. ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS HOJAS DE PAPEL

Utilizando los mejores datos obtenidos para realizar el destintado del papel, se realizó un experimento del cuál se extrajo la pulpa de cada una de las corrientes de la columna de flotación y con ellas se realizaron hojas de papel. Las hojas de papel se elaboraron y caracterizaron de acuerdo a la norma empleada en la Industria Papelera CRISOBA S.A. de C.V. que se encuentra en la ciudad de Morelia, Michoacán, la cual nos brindo todas las facilidades para utilizar sus laboratorios.

Una vez que se obtiene la pulpa de papel con la que se van a elaborar las hojas se siguen los siguientes pasos:

- Se calcula la consistencia de la pulpa.
- Se calculan los gramos húmedos de pulpa de papel que se requieren para elaborar 3 hojas, ya que en las pruebas de tensión y rasgado se requiere cortar una hoja y en las de opacidad y blancura se requiere otra, por lo que para contar con una hoja como reserva, se requieren las tres hojas por cada muestra. (Nota: las hojas elaboradas para este propósito siempre son circulares, así lo indica la norma TAPPI T-205-OM-81 y el equipo para elaborarlas esta diseñado para que resulten circulares).
- Esa cantidad de pulpa se coloca en un desfibrador, se le agrega un litro adicional de agua y se centrifuga a 2000 rpm.
- Se saca la pulpa del desfibrador y se le agrega agua hasta aforar a 3 litros.
- Se toma un litro para la elaboración de cada una de las hojas.
- Se deposita el litro de la pulpa de papel en el formador de las hojas previamente limpiado.
- Se llena el formador de hojas con agua caliente hasta que se llena hasta un tercio aproximadamente, se agita la pulpa hasta que se homogeniza en el agua.
- Se abre la palanca del desagüe y se le tira el agua (Nota: el formador de hojas tiene una palanca en el fondo con la que se abre una entrada de agua caliente que se llena desde el fondo al estar cerrado el formador de hojas, y tiene una segunda palanca con la que se abre el desagüe para dejar salir el agua de la pulpa y que en la malla del fondo quede formada la hoja de papel).

- Se abre el formador de hojas y se le extrae el exceso de agua a la hoja formada presionándole con una hoja de papel secante, se toma una segunda hoja de papel secante y se le vuelve a presionar, y con ella se le desprende a la hoja de papel del fondo del formador de hojas teniendo mucho cuidado de que no se rompa la hoja (Figura 3.8). El papel secante es un papel especial que parece tela muy gruesa, y que tiene la capacidad de absorber mucha agua, no es desechable ya que después de haberlo usado simplemente se extiende y se deja secar para



usarlo posteriormente.

Figura 3.8. Proceso para formar las hojas de papel con la fibra destintada.

- La hoja formada se coloca sobre un disco metálico de acero inoxidable cuidando de que no se doble y quede lo más extendida posible, se le marca a la hoja con la identificación correspondiente, encima se le coloca una hoja de papel secante. La función del disco metálico es dejar lo más plana la hoja formada al introducirla en la prensa, de ahí la importancia de estirar la hoja formada al colocarla sobre el disco metálico para que no le queden arrugas.
- Se apilan todas las hojas formadas siguiendo el siguiente orden: disco metálico- hoja formada- hoja de papel secante- hoja de papel secante- hoja formada- disco metálico- hoja formada... etc.
- Las hojas apiladas deben quedar con un disco metálico abajo y otro arriba, estos discos no deben de tener hojas simplemente dan firmeza al grupo de hojas apiladas al meterlas a la prensa donde se introducen durante 5 minutos.

- Se sacan las hojas de la prensa, se les quita el papel secante, a los discos metálicos que por sus dos caras contienen hojas se les coloca en unos portadiscos que quedan de forma pilada (Figura 3.9) y se introducen en un secador donde se dejan por 3 horas. Los portadiscos son aros metálicos con orificios grandes en sus paredes para dejar salir la humedad aunque estén apilados, en ellos se incrustan los discos metálicos con las hojas.



Figura 3.9. Acomodo de los aditamentos para el prensado y secado de las hojas formadas.

- Se sacan los portadiscos del secador, se les extrae los discos y se desprenden las hojas de los discos las cuales deben introducirse a una bolsa de plástico hermética para evitar que se mojen o tomen humedad del ambiente, después de esto ya se les puede hacer las pruebas de caracterización deseadas a las hojas.

Las características de peso, calibre, tensión, rasgado, opacidad, blancura y composición se determinan de acuerdo al procedimiento que se mencionó en el capítulo II.

3.7. APLICACIÓN DE LA SUBROUTINA PARA DESTINTADO DE PAPEL

Esta etapa consistió en utilizar los datos experimentales que se obtuvieron en la primera parte para aplicarlos en la rutina de escalamiento siguiendo los siguientes pasos:

- Primeramente se elaboró un programa en Excel en donde se introdujeron las fórmulas de la rutina de escalamiento para que el programa realizara los cálculos del escalamiento.

- Se calculó la recuperación de tinta con datos teóricos aplicados a una columna con dimensiones iguales a la columna utilizada en la primera etapa de experimentación.
- Los resultados experimentales con los parámetros de operación y cinéticos se alimentaron a la rutina y se compararon los resultados teóricos calculados mediante la rutina con los experimentales o reales.
- Se introdujeron los datos de las condiciones requeridas (obtenidas experimentalmente en la columna chica) a la rutina de escalamiento, considerando ahora una columna de mayores dimensiones.
- Una vez que se realizó la rutina de escalamiento solo quedaba realizar los experimentos en la columna grande para comprobar que los resultados reales fueran los que predijo la rutina de escalamiento.

3.8. PROYECCIÓN Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE ESCALAMIENTO PARA DESTINTAR PAPEL EN UNA COLUMNA DE FLOTACIÓN DE LABORATORIO DE DIMENSIONES MAYORES.

Se construyó una columna de flotación de laboratorio de mayores dimensiones que la primera, hecha de material acrílico transparente de 10 cm de diámetro interno y 405 cm de altura. A lo largo de la columna se instalaron dos transductores de presión. Estos se localizaron a 107 y 256 cm. desde la base de la columna. El punto de alimentación se colocó a 293 cm de altura desde la base de la columna. La Figura 3.10 muestra esquemáticamente la columna II de laboratorio empleada en la última etapa de la experimentación.

Se instaló en la base de la columna un burbujeador del tipo rígido poroso fabricado de acero inoxidable (Moot Industrial) con un diámetro nominal de poro de 2 μm . El burbujeador cilíndrico tiene un diámetro externo de 2.5 cm. y 5 cm. de altura (Área superficial= 39.27 cm^2).

En el fondo de la columna a un lado del burbujeador se adaptó una salida para la corriente de colas o desechos de 2 cm. de diámetro.

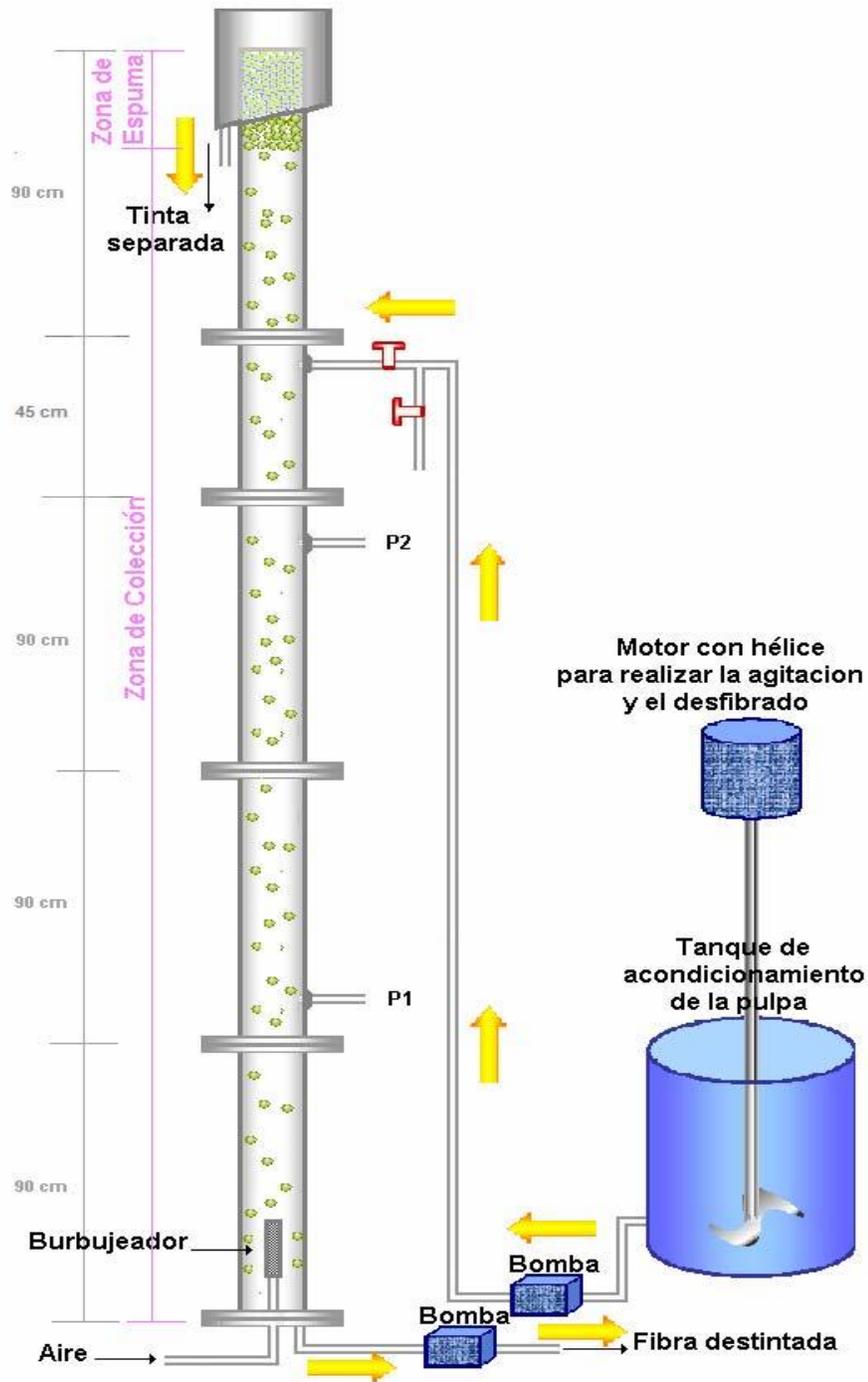


Figura 3.10. Esquema experimental de la segunda Columna de Flotación de laboratorio.

Los flujos en las corrientes de alimentación y colas fueron manipulados mediante dos bombas peristálticas (Masterflex: easy load y console drive).

El aire comprimido alimentado a la columna se manipuló y midió a través de un rotámetro de esfera (Gilmont Instruments) con capacidad de 0 a 16 L/min.

El acondicionamiento de la pulpa se hizo en un tanque con deflectores y agitando con un mezclador de 1 HP marca Siemens.

La temperatura de la pulpa se midió permanentemente mediante un termómetro de vidrio con la ampolla de mercurio. La temperatura de la pulpa se manipuló usando una resistencia eléctrica comercial.

El pH de la pulpa se midió con un medidor de pH Horiba.

En esta etapa se incremento el volumen de la pulpa preparada pero se conservó la densidad de la pulpa y la concentración de espumante, en comparación con los experimentos de la etapa anterior.

Se realizaron los experimentos de acuerdo a los parámetros alimentados a la rutina de escalamiento. Al igual que en el caso de la primera etapa, en la columna I, se colectó pulpa de las diferentes corrientes de la columna II y se elaboraron las hojas requeridas para su caracterización. Se caracterizaron las hojas elaboradas y sus resultados se compararon a los de las hojas producto de la columna I.

El Anexo J contiene los resultados de esta etapa del estudio y en el siguiente capítulo se discuten los resultados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4. INTRODUCCIÓN

La aplicación de la rutina de escalamiento propuesta por J. A. Finch y G. S. Dobby (1989) requiere de la determinación de los parámetros de operación y cinéticos de la columna de flotación.

En este capítulo se discuten los resultados experimentales de obtención de los parámetros mencionados y la solución al modelo de escalamiento. Los resultados sugeridos se prueban en una columna de 10 cm de diámetro y 4.05 metros de altura.

4.1. PRIMERA ETAPA: DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Los parámetros de operación determinados experimentalmente fueron: tensión superficial de la pulpa (σ , dinas/cm), velocidad superficial del aire (J_g , cm/s), nivel de la interfase (H_e , cm) y la densidad de la pulpa (ρ , gr/cm³).

4.1.1. Determinación de la Tensión Superficial (σ , dinas/cm)

La Figura 4.1 muestra las relaciones flujo superficial de aire-fracción volumétrica de gas para el sistema aire-agua. Los resultados experimentales se incluyen en el Anexo D. Se observa en la figura que la fracción de gas aumenta con el flujo de aire, y con la disminución en la tensión superficial del líquido. Las fracciones volumétricas de gas son mayores cuando se producen burbujas pequeñas. Estas burbujas ascienden a menor velocidad que las burbujas grandes y se acumulan en la zona de colección de la columna, dando lugar a incrementos en la fracción de gas retenido (ϵ_g). La diferencia entre la máxima fracción de gas para un J_g de 2.0 es del orden de 610 % para los casos de agua sin espumante y con 60 ppm de surfactante, respectivamente. A partir de adiciones de espumante de 40 ppm, prácticamente la fracción volumétrica de gas no varía, al no disminuir significativamente la tensión superficial del líquido, de acuerdo a la Tabla IV. 1.

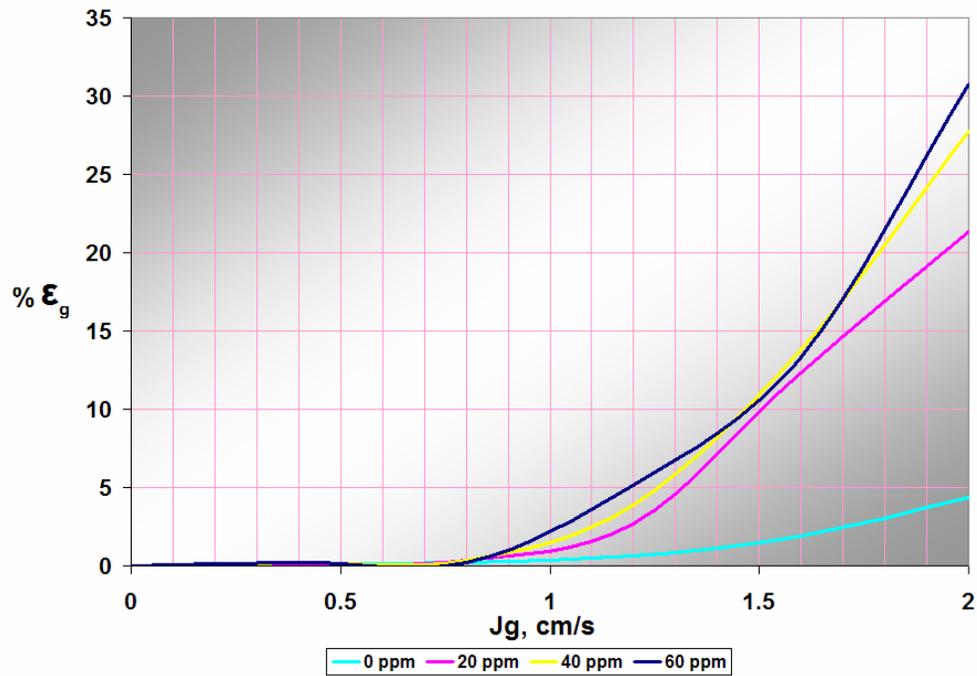


Figura 4.1. Grafica de los experimentos de los sistemas agua-espumante variando las concentraciones de espumante.

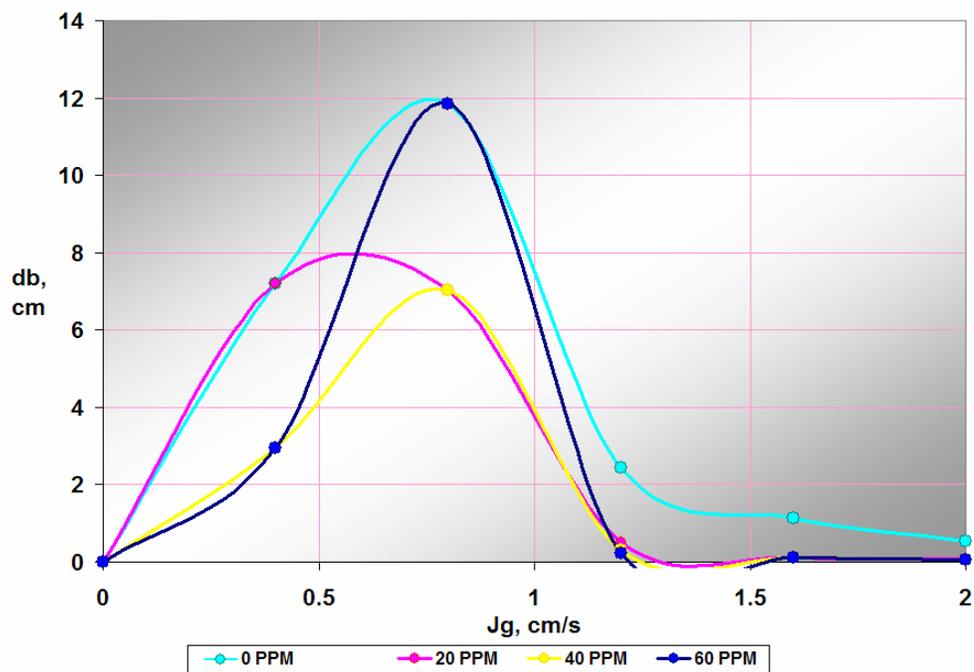


Figura 4.2. Efecto de la tensión superficial en el diámetro de burbuja.

Para comprobar que a mayor concentración de espumante, es decir a menor tensión superficial disminuyen los diámetros de burbujas de aire, se calcularon estos diámetros por el método del drif flux y se graficaron en la figura 4.2, donde se observa que conforme aumenta la velocidad superficial del aire (J_g), disminuye el diámetro de burbuja y aunque las líneas siguen el mismo comportamiento, en todas en las que se utilizó espumante hay una disminución del diámetro de burbuja en comparación con la que no uso espumante.

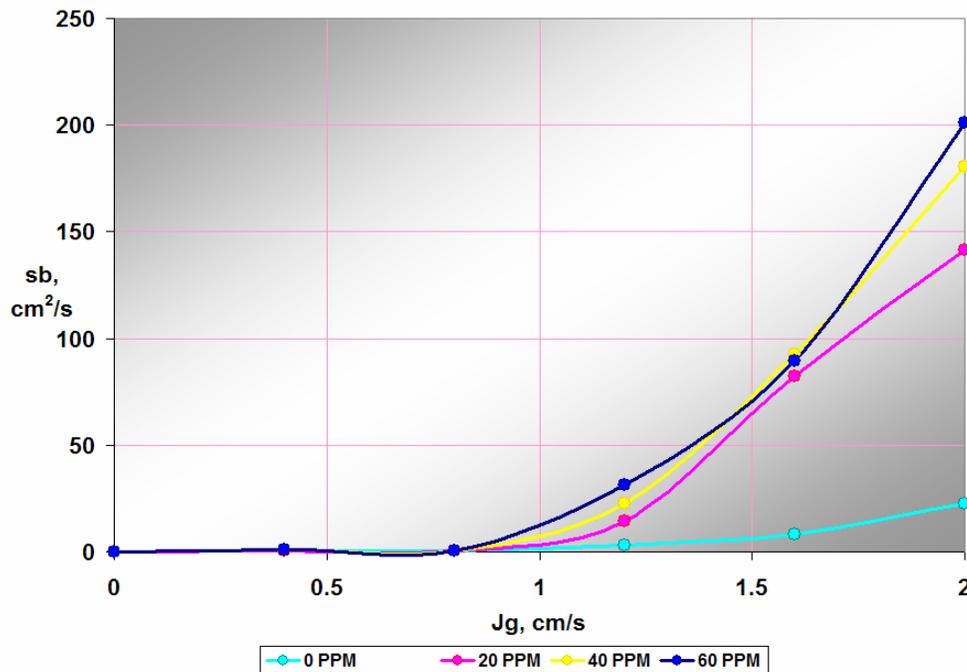


Figura 4.3. Efecto de la tensión superficial en el área superficial de burbujas.

Igualmente para observar el efecto de la concentración de espumante, es decir el efecto de la disminución de la tensión superficial en el área superficial de burbujas, se muestra la grafica de la figura 4.3 la cual como resultado da una imagen idéntica a la de la figura 4.1, y por eso se puede decir que a mayor concentración de espumante se logran áreas superficiales mayores, es decir existe mayor probabilidad de que la tinta sea capturada por las burbujas. De alguna manera en esta figura se nota la ventaja que existe entre cada aumento de espumante ya que aquí si se notan separadas las líneas a diferencia de la figura 4.2 en donde al final las líneas se traslapan y no se nota la ventaja entre un

espumante y otro. Los valores calculados de diámetro y área superficial de burbujas se reportan en el Anexo D.

De las figuras anteriores se concluye que a manera de evitar algún efecto en la reproducibilidad de datos, causado por las variaciones en la concentración del surfactante, por la volatilidad del mismo, el valor de la tensión superficial se fijó en 46.5 dina/cm, al adicionar 50 ppm del aceite de pino, para el resto de la experimentación.

Tabla IV.1. Valores de tensión superficial para concentraciones de aceite de pino en agua corriente.

PPM	Tensión Superficial
0 (Agua)	72.4 dina/cm
20	62.0 dina/cm
40	51.7 dina/cm
50	46.5 dina/cm
60	41.4 dina/cm

Si bien es sabido que los espumantes por ser compuestos alcohólicos, al transcurrir el tiempo se van volatilizando, es lógico pensar que al aumentar su temperatura esto ocurre mas rápidamente, por lo que para comprobar dicho efecto se midió la tensión superficial de la solución agua-espumante con un pH de 8 a temperatura ambiente (25 °C) y a 50 °C, los resultados se muestran en la tabla IV.2 y se puede observar que inicialmente se tenía a temperatura ambiente una tensión superficial baja, y al aumentar la temperatura esta sube por lo que podemos concluir que ha habido una disminución de la concentración del espumante en la solución del 13% en su eficiencia aproximadamente en 1 hr, esto se compensa con la cantidad excedente de espumante que se agrega al en lugar de utilizar 40 ppm se utilizan 50 ppm, como ya se explico anteriormente.

Tabla IV.2. Comparación de la tensión superficial de una solución agua-espumante a 25°C y 50°C.

SUSTANCIA	SOLUCIÓN AGUA-ESPUMANTE		AGUA
Temperatura	25 °C	50 °C	25 °C
Tensión Superficial	55.88 dina/cm	64.16 dina/cm	72.4 dina/cm

4.1.2. Determinación del Flujo Superficial de Aire (J_g , cm/s)

La relación entre la fracción volumétrica de gas y la velocidad superficial de aire se muestran en el Anexo E y la Figura 4.4, para un sistema con 50 ppm de espumante ($\sigma=46.5$ dinas/cm), $T= 50$ °C, $pH=8$, densidad de pulpa de papel de 0.7 gr/cm³ y 20 cm de nivel de interfase.

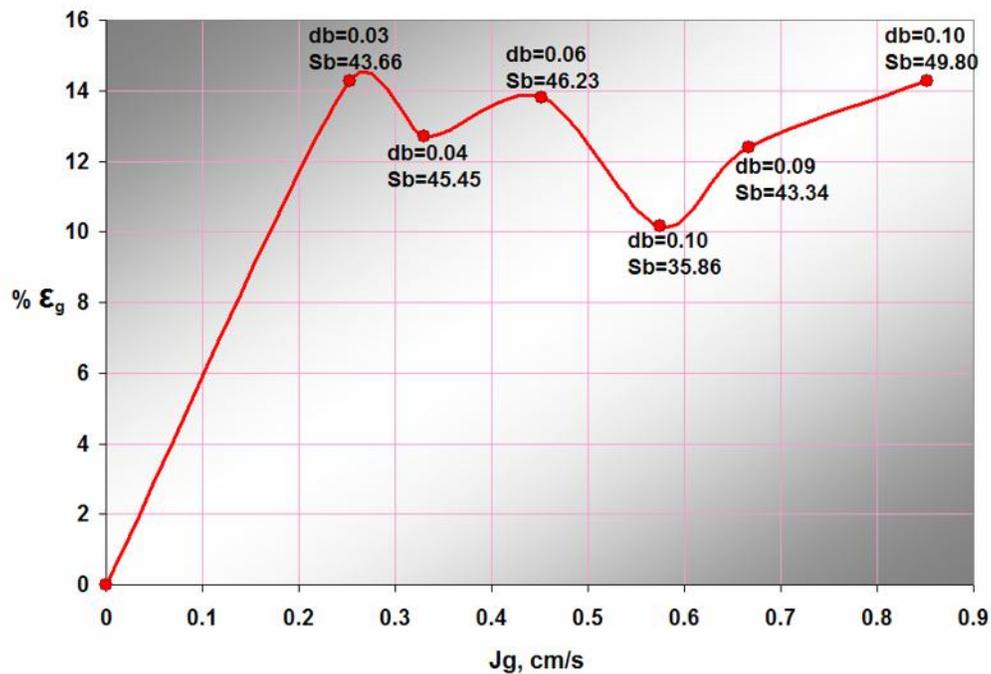


Figura 4.4. Relación entre la fracción volumétrica de gas y el flujo superficial de aire para una pulpa de papel con las condiciones anteriormente mencionadas.

Como se puede apreciar, la fracción de gas se incrementa con el flujo de aire inyectado. El máximo valor en ϵ_g se alcanza a partir de flujos superficiales de aire

de 0.25 cm/s, y se mantiene relativamente constante hasta los valores de 0.85 cm/s.

Al igual que ε_g , el diámetro promedio de burbuja se incrementa con J_g tal y como se muestra en la Figura 4.5.

El diámetro de burbuja se estimó por el método del drift flux como se menciona en el Capítulo II.

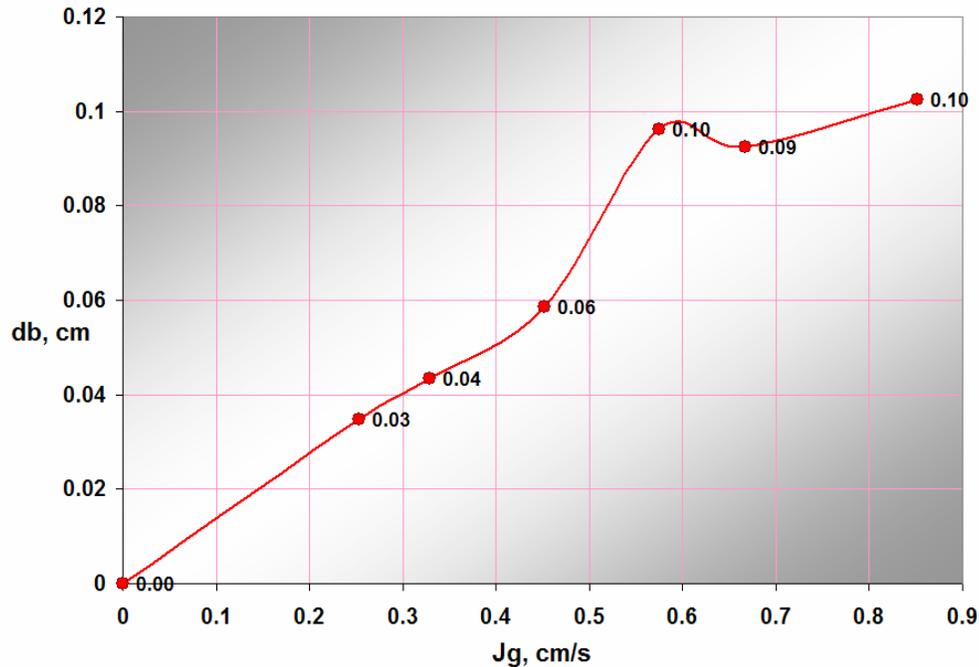


Figura 4.5. Cambios en el diámetro de burbuja para diferentes valores de flujo superficial de aire de los datos de la figura 4.4.

La relación entre el área superficial de burbujas, disponible para el transporte de masa, y el flujo superficial de aire se muestra en la Figura 4.6. Como se puede observar, existe un máximo en S_b que para este caso en particular es de 49.8 /cm.

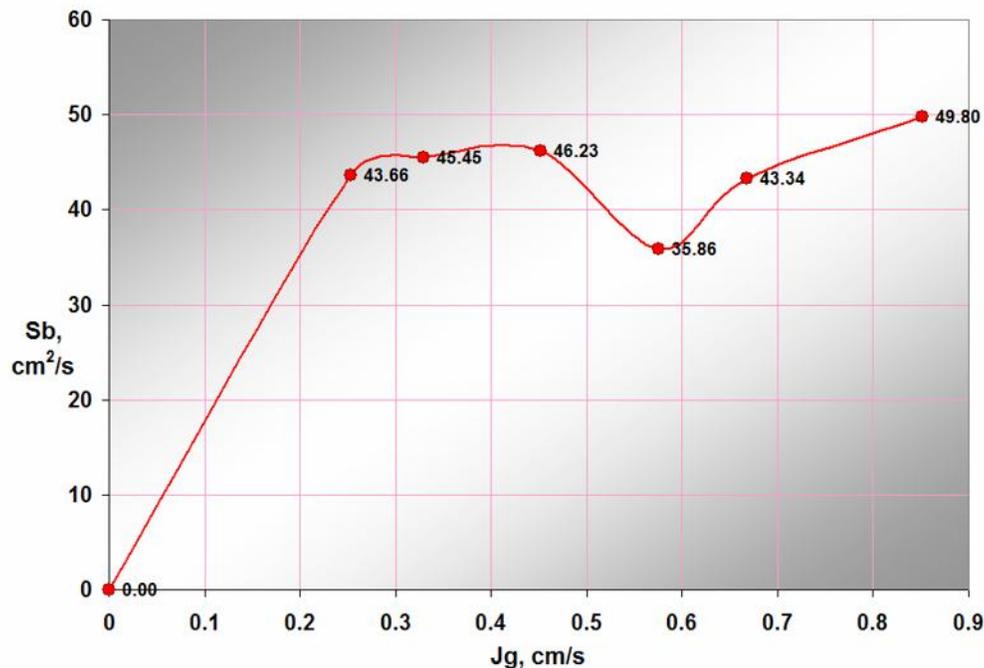


Figura 4.6. Valores calculados de área superficial de burbujas para los datos de la figura 4.5.

Considerando que la mayor área superficial de burbujas representa la posibilidad de transportar más cantidad de masa o tinta, se concluye que la inyección de aire a la columna, a un flujo de 0.85 cm/s es el más conveniente para los siguientes experimentos de destintado, evitando además que la turbulencia a Jg mayores se refleje en el regreso de tinta separada hacia la zona de colección y la baja en la recuperación tanto de tinta como de fibra destintada.

4.1.3. Determinación del Nivel de la interfase (H_e , cm)

Los valores obtenidos de recuperación de fibra de papel destintada al variar la altura del nivel de la interfase en la columna de flotación fracción se muestran en el Anexo F y en la figura 4.7, para un sistema con 50 ppm de espumante ($\sigma=46.5$ dinas/cm), $T= 50$ °C, $pH=8$, densidad de pulpa de papel de 0.7 gr/cm³ y $J_g=0.85$ cm/s, donde se observa que la mayor recuperación de fibra destintada se obtiene para espesores de espuma de 50 cm, con un 94.97%, mientras que para el caso de profundidad de espuma de 30 cm la recuperación es del 92.31%.

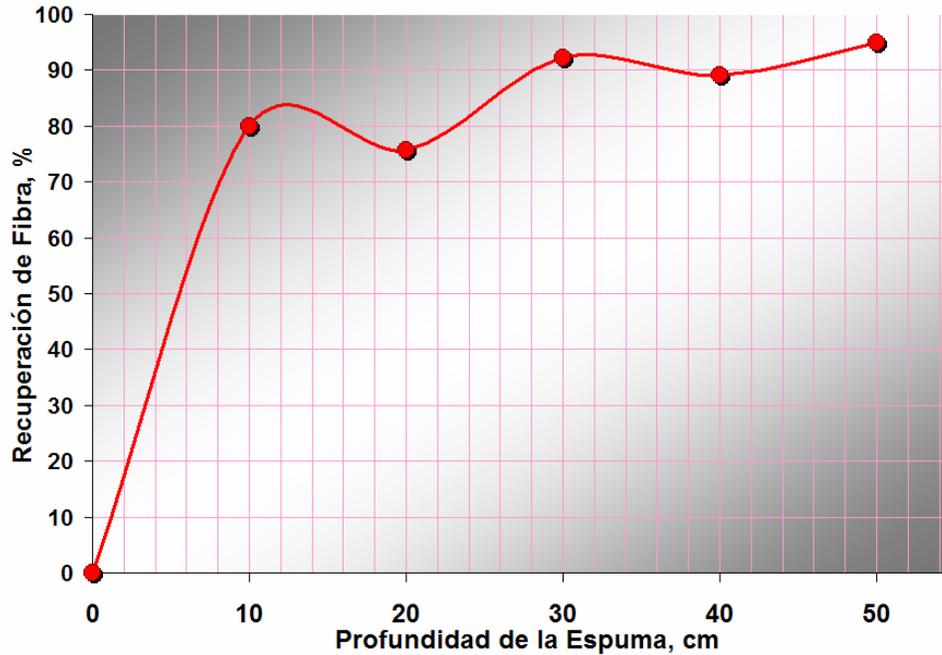


Figura 4.7. Efecto de la profundidad de la espuma en la recuperación de fibra destintada.

De treinta a cincuenta centímetros de espesor de espuma, la recuperación de fibra destintada es prácticamente la misma; sin embargo, existen otros factores a considerar. En el caso de una posición de interfase a 30 cm se observó un mejor control de la misma, comparado con profundidades mayores. Por otra parte, al disminuir la zona de espuma, se aumenta la zona de colección y por lo tanto es posible procesar mayor volumen de pulpa de papel; se tiene mayor tiempo de residencia de las partículas de tinta y se incrementa la probabilidad de captura de las mismas. Por lo anterior, se determinó que el espesor de espuma de 30 cm es el más adecuado.

Aunque al tener mayor zona de colección, se procesa mayor cantidad de pulpa de papel y se podría entender que esto permite una mayor productividad, es necesario aclarar que la productividad no depende únicamente de la zona de colección, sino también esta en función del tiempo de residencia, ya que aunque al tener mayor tiempo de residencia aumenta la probabilidad de la separación de la tinta, en un proceso industrial significaría la disminución en la productividad, ya

que a mayor tiempo de residencia se procesa más lentamente la pulpa y por lo tanto la productividad baja.

4.1.4. Establecimiento de la Densidad de la pulpa (ρ , gr/cm³)

Los valores obtenidos de recuperación de fibra de papel destintada al variar la densidad de la pulpa se muestran en el Anexo G y en la Figura 4.8. Para un sistema con 50 ppm de espumante ($\sigma=46.5$ dinas/cm), $T= 50$ °C, $pH=8$, $J_g=0.85$ cm/s y un nivel de interfase de 30 cm, se obtuvo un máximo en la recuperación de 95.1%, para una densidad de pulpa de 0.8 gr/cm³.

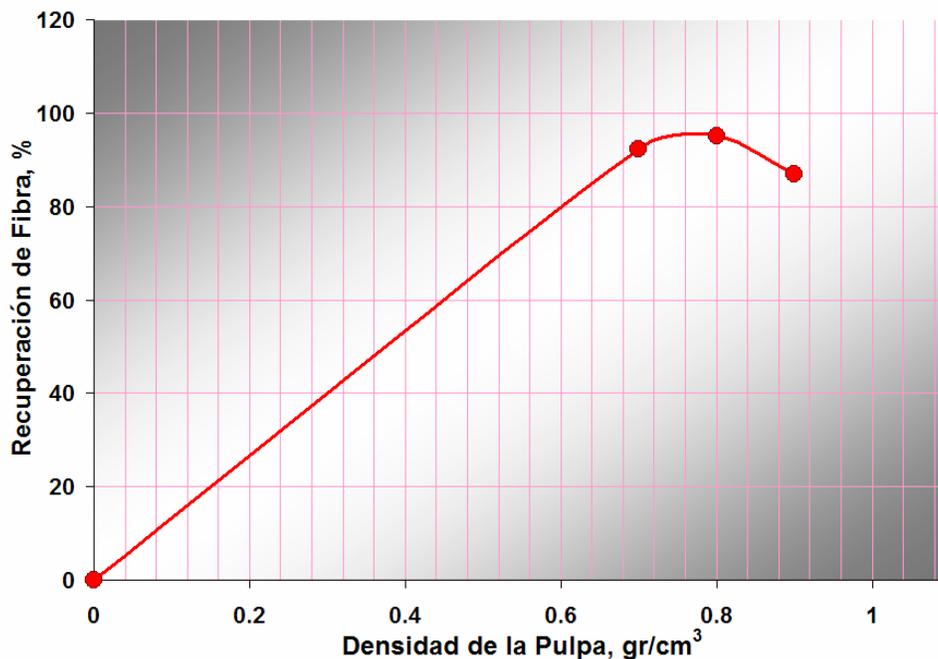


Figura 4.8. Efecto de la densidad de la pulpa en la recuperación de fibra destintada.

Se realizaron también experimentos con densidades de 1.0 y 1.1 gr/cm³ y se observó que era imposible tener un nivel de interfase y que la espuma de concentrado de tinta rebozara la columna, ya que la espuma formada con estas densidades estaba muy seca, pesada o densa, con lo que podemos concluir que a densidades de pulpa de 1.0 gr/cm³ o mayores la pulpa de papel no puede ser tratada en un sistema de flotación sin agua de lavado, por esa razón no se pudieron obtener los puntos de ellas en esta gráfica.

No se utilizó agua de lavado debido a la dificultad que representa el hecho de por una parte diluir la pulpa y entonces obtener recuperaciones muy bajas y por otra parte se ha reportado en la literatura que el agua de lavado promueve el regreso de partículas de tinta a la zona de colección (Watson y colaboradores, 1996 [3.1]).

De lo anterior se concluye que la densidad de pulpa de papel más adecuada es de 0.8 gr/cm^3 .

4.1.5. Medición del Tiempo de residencia

Los datos de cambio en la conductividad de la fase continúa al introducir la solución salina con respecto al tiempo se muestra en el Anexo H y se puede observar en la Figura 4.9, para un sistema con 50 ppm de espumante ($\sigma=46.5 \text{ dinas/cm}$), $T= 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH}=8$, densidad de pulpa de papel de 0.8 gr/cm^3 , $J_g=0.85 \text{ cm/s}$ y un nivel de interfase de 30 cm.

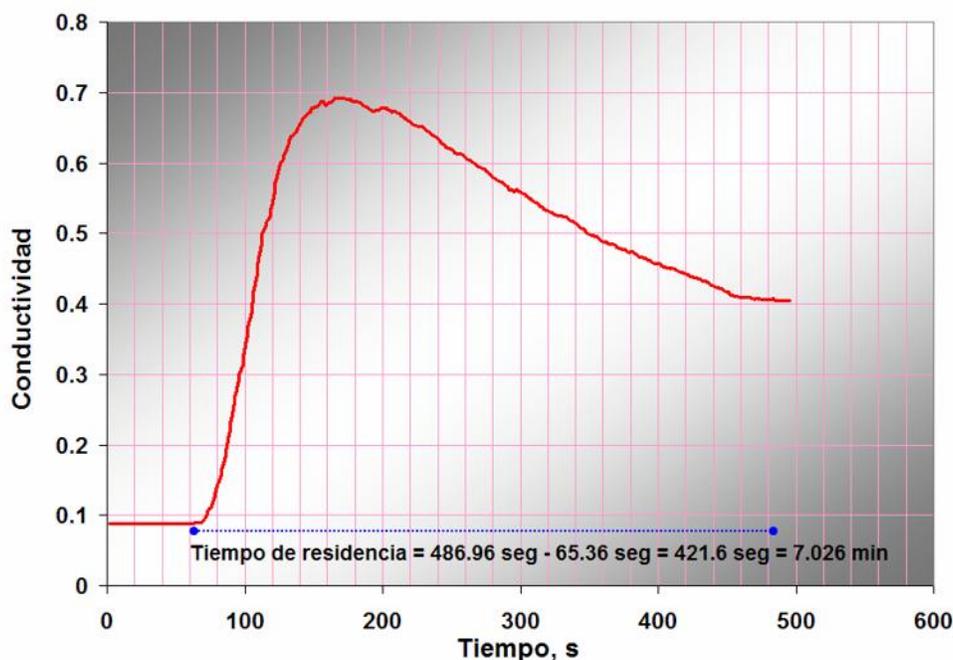


Figura 4.9. Determinación del tiempo de residencia de la pulpa en la zona de colección para la columna de 7.5 cm de diámetro y 270 cm de altura.

En la gráfica se ve al inicio una línea recta que no varía ya que en ese lapso la solución salina aún no es detectada por la celda de conductividad colocada a la

salida de las colas de la columna. Al detectar la celda el paso de la solución salina, la conductividad de la fase continúa se incrementa rápidamente hasta alcanzar su máximo valor. Posteriormente la señal de conductividad va disminuyendo lo que quiere decir que la solución salina está saliendo y la pulpa de papel que entra después como no tiene solución salina se mezcla y baja la concentración hasta el punto en que la curva se vuelve nuevamente una recta aunque detectando un valor de conductividad mayor con respecto al valor inicial, debido a la recirculación de la solución salina con el resto de la pulpa que se alimenta nuevamente a la columna.

Se calculó también el tiempo de residencia de acuerdo a la ecuación (3.2) del capítulo anterior y se comparó con el tiempo real como se muestra en la tabla IV.3.

Tabla IV.3. Comparación del Tiempo de Residencia medido con el Tiempo de Residencia calculado.

TIEMPO DE RESIDENCIA MEDIDO (τ, min)	TIEMPO DE RESIDENCIA CALCULADO (τ, min)
7.026	10.42

El tiempo de residencia calculado se hizo considerando un régimen de flujo de mezclado perfecto. Este modelo considera un retardo en la columna por parte de la pulpa, dado por un cierto grado de mezclado que hace recircular la pulpa en la zona de colección de la columna. La diferencia entre los tiempos de residencia medido y calculado señala que el grado de recirculación de la pulpa en realidad no es tan prolongado (considerando además el relativamente bajo valor de $J_g = 0.85$ cm/s), resultando en un tiempo de residencia medido menor que el calculado. Con esto se concluye además que la columna observa un comportamiento intermedio entre el mezclado tipo pistón y el mezclador perfecto, como lo establecen investigadores como Finch y Dobby (1985) [4.1] y Yianatos y colaboradores (1988) [4.2].

4.1.6. Caracterización de las hojas

Una vez que se elaboraron las hojas de papel (Figura 4.10), en el equipo de Industria Papelera CRISOBA S.A. de C. V. como se mencionó en el Capítulo III, se

les realizaron las pruebas conforme a la norma que se utiliza en dicha empresa (TAPPI T-205-OM-81), éstos resultados se muestran en la tabla IV.4.

4.1.6a. Papel periódico: En este papel a excepción de la tensión todos los demás valores son menores a los de las otras hojas, en cuanto a la opacidad y blancura, no se pueden medir estas características a causa de las letras en las hojas; es decir, a la variación de la pigmentación en las hojas. En lo que a su composición se refiere, los porcentajes son muy similares a los de las hojas de la alimentación y las colas.

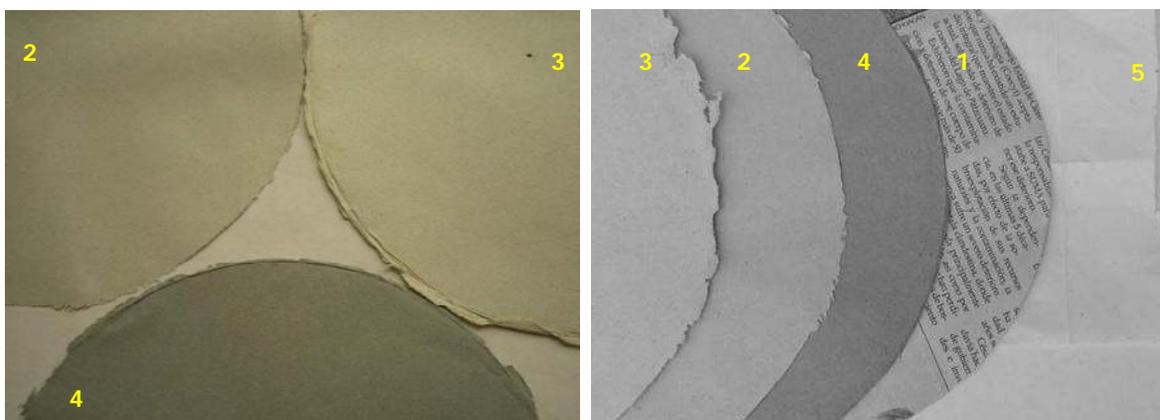


Figura 4.10. Hojas de papel hechos de acuerdo a la norma TAPPI T-205-OM-81 para los ensayos físicos: 1) Papel periódico, 2) Alimentación, 3) Colas, 4) Concentrado y 5) Celulosa Virgen.

Tabla IV.4. Datos de la caracterización de las hojas de papel mostrados en la Figura 4.10.

PROPIEDAD	PAPEL		HOJAS ELABORADAS EN CRISOBA CON		
	PERIÓDICO	ALIMENTACIÓN	COLAS	CONCENTRADO	HOJAS ELABORADAS EN CRISOBA CON CELULOSA VIRGEN
Peso, gr	1.4	2.3	2.2	1.7	1.8
Calibre, μm	74.5	175.5	175.0	109.5	125.0
Tensión, kg	2.0	2.6	2.5	0.7	1.6
Rasgado, gr/ft	22.4	53.0	52.7	52.7	25.6
Opacidad, %	(no se mide)	95.6	97.3	99.6	80.5
Blancura, fotovol	(no se mide)	54.3	56.7	31.5	80.8
Composición					
% Fibras Eucalipto	✓	2.5	5.0	✓	92.0
% de Fibras Encino	✓	13.8	17.5	✓	3.0
% de Fibras de Pino	✓	0.0	0.0	✓	5.0
% Pasta Termomecánica	✓	77.9	72.5	✓	
% de Bagaso	✓	5.8	5.0	✓	

4.1.6b. Alimentación: En este papel a pesar de ser el equivalente al del papel periódico original, todas sus características son superiores a las del papel periódico, esto se debe a que la muestra de la alimentación es la última en tomarse, es decir ya se le ha extraído parte de las fibras refinadas y que le restan resistencia al papel al tomar la muestra del concentrado.

4.1.6c. Colas: Este papel es de características muy parecidas a las del papel de la alimentación, como al papel no se le ha blanqueado y únicamente se le ha destintado, por esa razón los valores de la blancura son bajos, sin embargo, si se registra una diferencia en la blancura.

4.1.6d. Concentrado: En este papel si se nota una gran diferencia en comparación con la alimentación y las colas, sobre todo en la tensión y obviamente en blancura. Esto se debe a que sus fibras aunque son de composición similar sus características son notablemente diferentes, ya que son las fibras más refinadas del papel al haber pasado innumerables veces por el proceso de reciclado y con esto han adquirido un desgaste considerable que las ha cortado en cuanto a su longitud y les ha comprimido su diámetro ya que las fibras son como tubos. Lo anterior es sumamente importante porque la resistencia del papel se la dan las fibras cuando se entraman unas con otras. Considerando que la hoja en este caso contiene en su mayoría tinta separada es obvio suponer que la hoja formada con la muestra de esta corriente tendrá características físicas deficientes, además de que las fibras que se encuentran en el concentrado llevan consigo partículas de tinta de las que no se pudieron desprender como se muestra en la figura 4.11, y el querer recuperar estas fibras en las colas definitivamente afectaría la calidad del destintado en la corriente de colas y por lo tanto de la fibra recuperada como destintada.

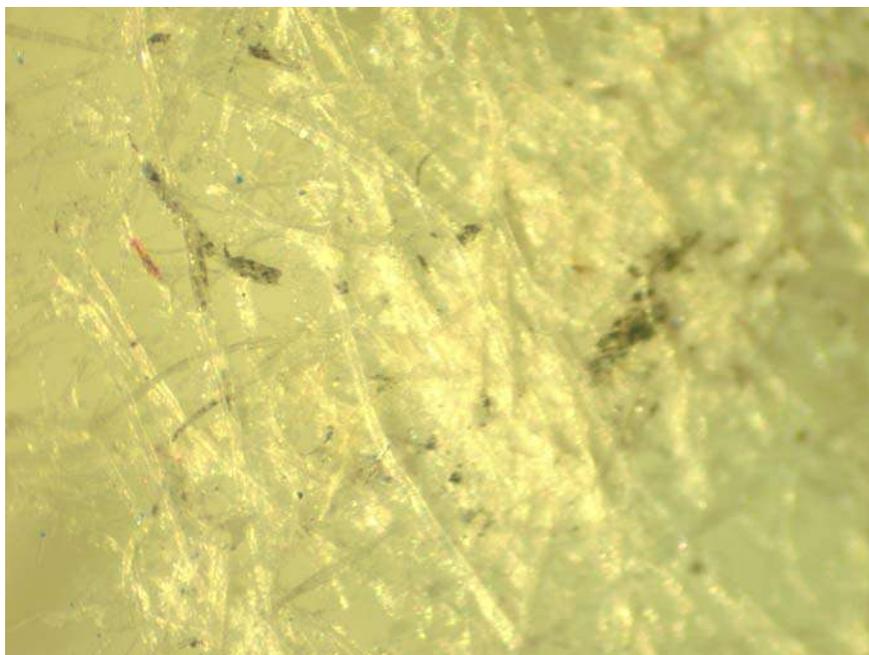


Figura 4.11. Fibras que aún después del destintado en la columna de flotación mantienen dentro de ellas partículas de tinta.

4.1.6e. Celulosa virgen: Esta hoja por estar elaborada con celulosa virgen, cuya composición es muy diferente a la del papel periódico nos sirve como referencia, y a excepción de la blancura podemos notar que las propiedades de las hojas de alimentación y colas están por encima de la hoja de celulosa virgen.

Por lo anterior, podemos decir que las hojas elaboradas con pulpa de papel de las corrientes de alimentación y colas de la columna de flotación, fueron las que presentaron las mejores propiedades.

4.1.7. Determinación del J_g que proporciona la máxima recuperación de fibra de papel (J_g)

Los valores obtenidos de recuperación de fibra de papel destintada al variar la velocidad superficial del aire se muestran en el Anexo I y en la figura 4.12, para un sistema con 50 ppm de espumante ($\sigma=46.5 \text{ dina/cm}^3$), $T= 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH}=8$, densidad de pulpa de papel de 0.8 gr /cm^3 y un nivel de interfase de 20 cm., en la que se aprecia que el dato que proporciona la máxima recuperación es el $J_g=0.5 \text{ cm/s}$ y no el del $J_g=0.8 \text{ cm/s}$ que se aproxima más al de 0.85 cm/s que anteriormente fue

el que brindó los mejores resultados. El diámetro promedio de burbuja se incrementa con el J_g y después disminuye tal y como lo muestra la figura 4.13. La relación entre el área superficial de burbujas, disponible para el transporte de masa, y el flujo superficial de aire se muestra en la figura 4.14. Para descartar las dudas de cual de los dos J_g 's es el mejor, utilizamos los 2 datos en la rutina de escalamiento y en los últimos experimentos de corroboración de la predicción de la rutina.

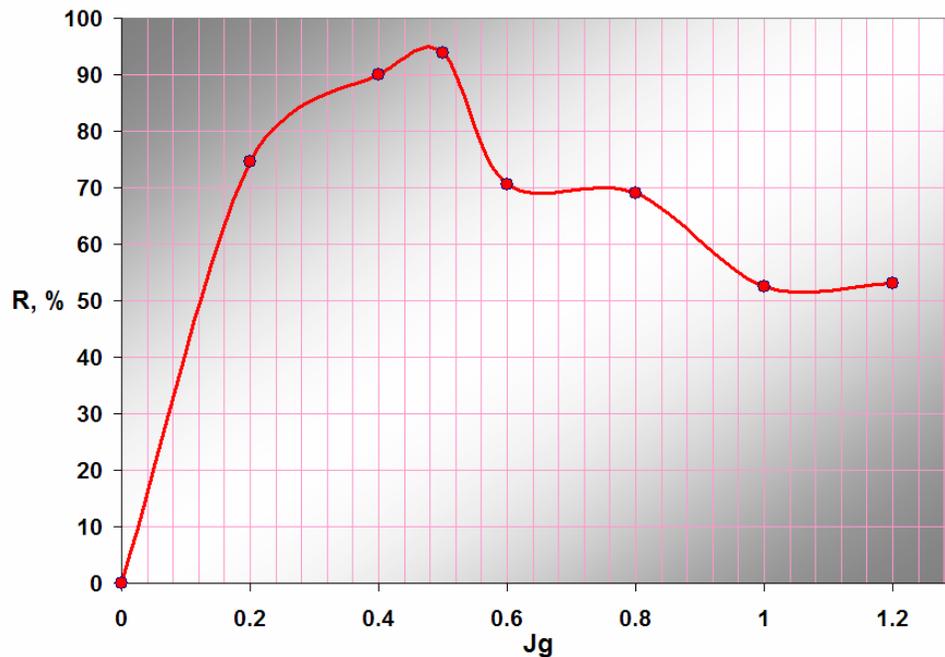


Figura 4.12. Gráfica de los experimentos de los sistemas de pulpa de papel variando la velocidad superficial del aire contra la recuperación.

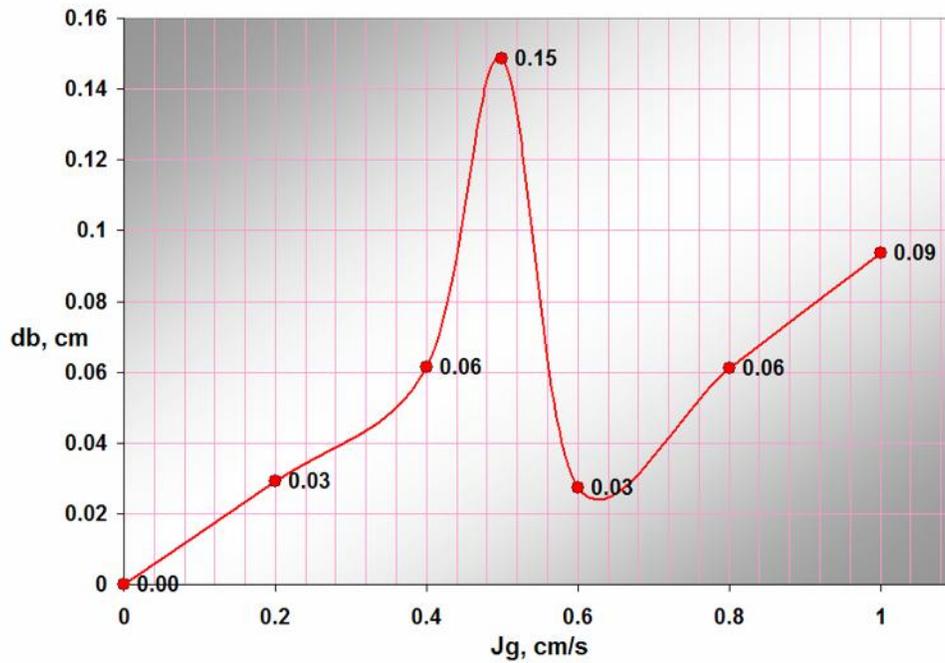


Figura 4.13. Gráfica de los diámetros de burbuja contra los Jg 's.

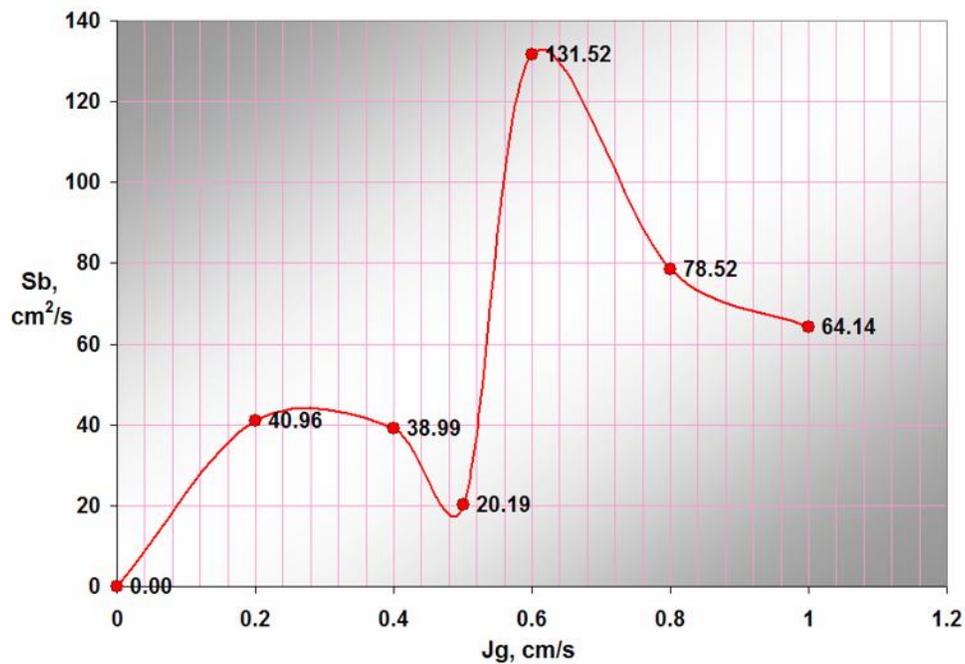


Figura 4.14. Gráfica de las áreas superficiales de burbuja contra los Jg 's.

4.2. SEGUNDA ETAPA: APLICACIÓN DE LA RUTINA DE ESCALAMIENTO PARA DESTINTAR PAPEL.

Este paso consistió únicamente en introducir a la rutina de escalamiento los datos cinéticos y experimentales que ya se habían obtenido. Estos datos se muestran en la tabla IV.5.

Tabla IV.5. Datos de la predicción de recuperación que proporciona la rutina de escalamiento.

Jg	<u>RECUPERACIÓN EN LA COLUMNA EXPERIMENTAL SEGÚN LA RUTINA DE ESCALAMIENTO</u>	<u>RECUPERACIÓN EN LA COLUMNA DE ESCALAMIENTO SEGÚN LA RUTINA DE ESCALAMIENTO</u>
0.5	82.6 %	81.7 %
0.85	82.3 %	81.4 %

Analizando los resultados de la predicción de la rutina de escalamiento se puede observar que los valores son prácticamente los mismos con una mínima variación de 1%. Sabiendo esto lo único que queda es seguir adelante con la experimentación en la columna grande para comprobar los datos.

4.3. TERCERA ETAPA: COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE ESCALAMIENTO PARA DESTINTAR PAPEL EN UNA COLUMNA DE FLOTACION DE MAYORES DIMENSIONES

Esta etapa consistió en llevar a cabo los experimentos del escalamiento, los cuáles se pudieron llevar a cabo sin ningún problema, por el contrario se observó que la separación de la tinta sucedía más fácil en la columna grande que en la columna pequeña. Los valores obtenidos de recuperación de fibra de papel destintada al variar la velocidad superficial del aire en la columna del escalamiento se pueden consultar en el Anexo J, así mismo se pueden ver en la figura 4.15., para un sistema con 50 ppm de espumante ($\sigma=46.5$ dina/cm³), T= 50°C, pH=8, Jg=0.85 cm/s, densidad de pulpa de papel de 0.8 gr/cm³ y un nivel de interfase de 30 cm., en donde el Jg=0.5 cm/s proporcionó una buena recuperación de la fibra

destintada de un 86.65%, valor mayor al valor predicho por la rutina de escalamiento de 81.7%, es decir el valor real superó al pronosticado en un 4.95%; y el $J_g=0.85$ cm/s proporcionó una recuperación de la fibra destintada que superó al punto anterior en un 5.66%, ya que la recuperación real fue de 92.31%, valor mayor al valor pronosticado por la rutina de escalamiento de 81.4%.

Tabla IV.6. Comparación de los datos reales y los datos predichos por la rutina de escalamiento.

Jg	COLUMNA EXPERIMENTAL		COLUMNA DE ESCALAMIENTO	
	R %, RUTINA	R %, REAL	R %, RUTINA	R %, REAL
0.5	82.6 %	93.84	81.7 %	86.65
0.85	82.3 %	83.83	81.4 %	92.31

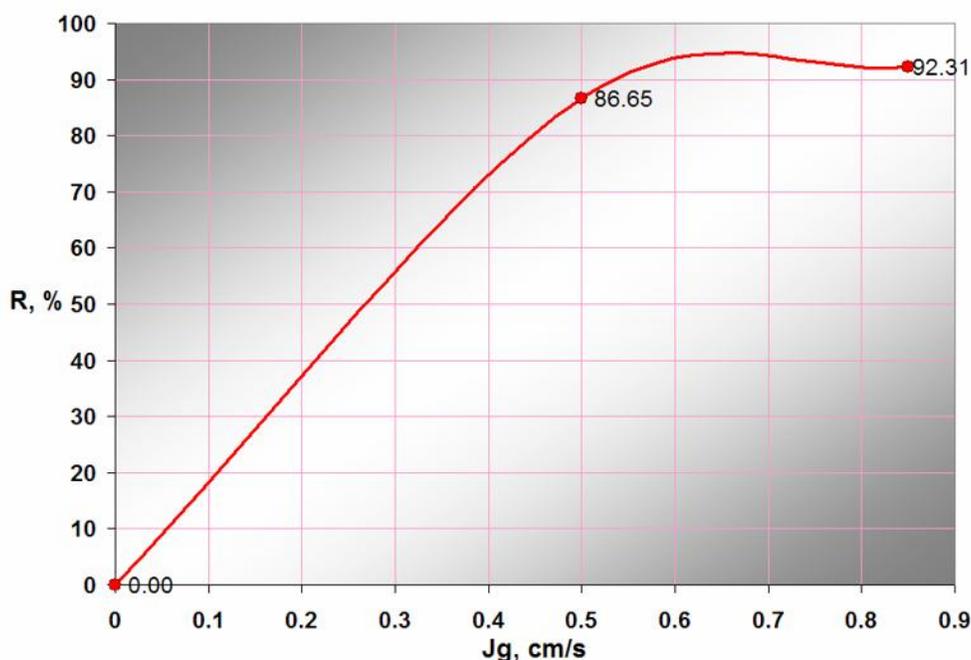


Figura 4.15. Gráfica de los experimentos de los sistemas de pulpa de papel variando la velocidad superficial del aire contra la recuperación en la columna de flotación del escalamiento.

Si bien es cierto que en ambos casos se obtuvieron mejores resultados de los esperados como se muestra en la tabla IV.6., es innegable que el mejor valor de

velocidad superficial del aire es el de 0.85 cm/s. Por lo anterior podemos decir que la rutina de escalamiento si cumple con lo que se pronosticó.

4.3.1. Caracterización de las hojas

Una vez que se elaboraron las hojas de papel, figura 4.16 producto de los experimentos del escalamiento, se les realizaron las pruebas que indica la norma TAPPI T-205-OM-81, dichos resultados se muestran en la tabla IV.7. Los resultados de la caracterización de las hojas procesadas en la segunda columna de flotación en general siguen la misma tendencia que los resultados de las hojas procesadas en la primera columna de flotación, es decir que tanto las hojas elaboradas con las corrientes de la alimentación y las colas son las que presentan las mejores propiedades y las hojas del concentrado presentan las peores.

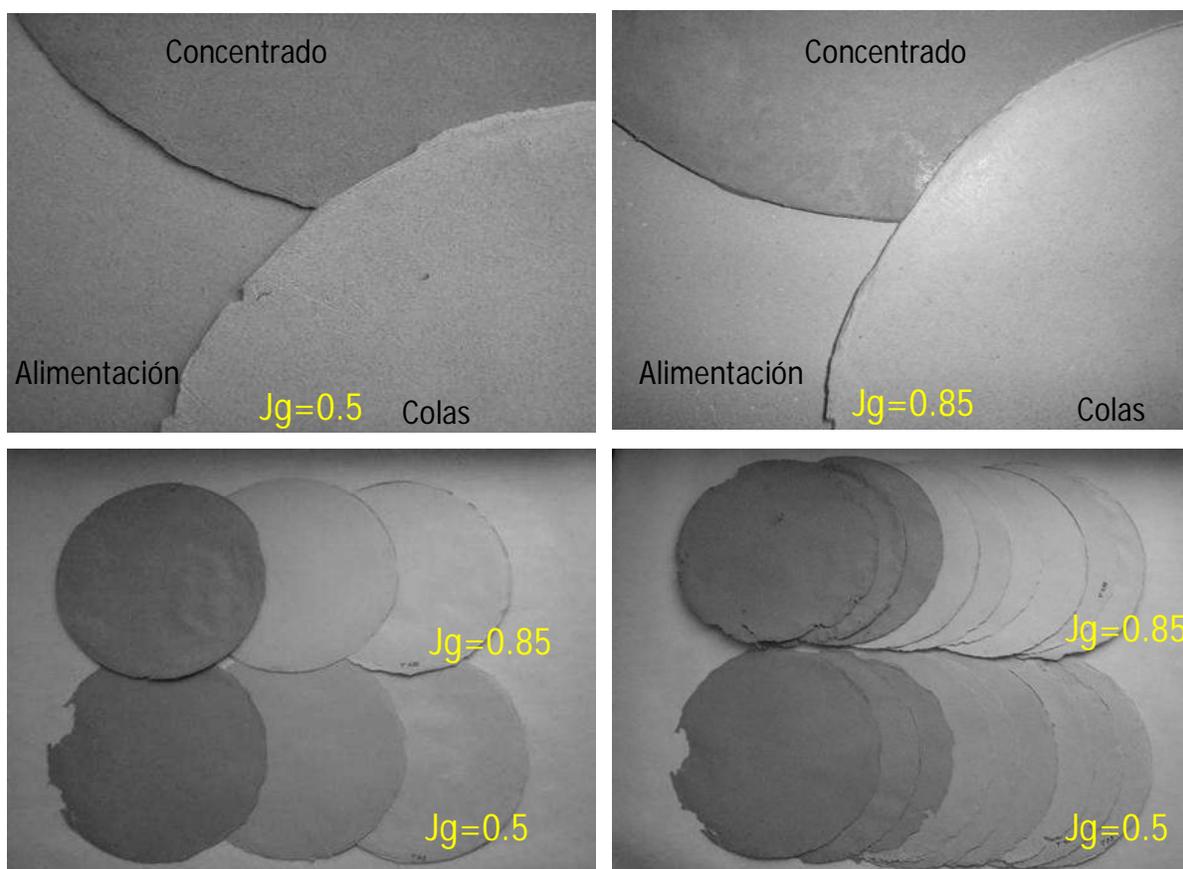


Figura 4.16. Fotografías de las hojas de papel elaboradas con pulpa de papel procesada en la segunda columna de flotación.

Tabla IV.7. Datos de la caracterización de las hojas de papel producto de la segunda columna de flotación.

PROPIEDAD	HOJAS ELABORADAS EN CRISOBA CON PULPA PROCESADA EN LA PRIMER COLUMNA Jg = 0.85 cm/s			HOJAS ELABORADAS EN CRISOBA CON PULPA PROCESADA EN LA SEGUNDA COLUMNA					
	ALIMENTACIÓN	COLAS	CONCENTRADO	Jg = 0.5 cm/s			Jg = 0.85 cm/s		
				ALIMENTACIÓN	COLAS	CONCENTRADO	ALIMENTACIÓN	COLAS	CONCENTRADO
Peso, gr	2.3	2.2	1.7	2.3	1.7	1.3	2.0	2.0	2.1
Calibre, μm	175.5	175.0	109.5	164.5	163.0	110.5	169.0	163.0	140.5
Tensión, kg	2.6	2.5	0.7	2.1	0.9	0.5	1.7	1.5	1.9
Rasgado, gr/ft	53.0	52.7	52.7	52.3	35.9	30.3	52.9	41.6	27.1
Opacidad, %	95.6	97.3	99.6	99.9	100.0	98.2	90.8	96.3	99.9
Blancura, fotovol	56.7	54.3	31.5	44.7	51.2	35.4	51.7	49.7	31.6

- **Jg=0.5 cm/s.** Las hojas del concentrado elaboradas con este Jg, tienen una resistencia a la tensión, notablemente, más baja en comparación a las hojas del concentrado del Jg=0.85 cm/s, esto va relacionado con el calibre y el peso de la hoja que también es muy bajo.
- **Jg=0.85 cm/s.** Las hojas del concentrado elaboradas con este Jg, sorprendentemente destacan por ser las que tienen mayor resistencia a la tensión y mayor peso en comparación con las de la alimentación y colas del su mismo Jg.

Referente a la característica de opacidad, en el total de las hojas este valor permanece constante, lo que implica que el procedimiento no tiene relación con el brillo de la fibra destintada. Es necesario mencionar que este valor cambia en el proceso de blancura.

A simple vista las hojas entre uno y otro concentrado son diferentes en cuanto a su espesor, no obstante que para su elaboración se realizaron los cálculos de consistencia de la pulpa para producir hojas con las mismas características según la norma. Esto demuestra que el proceso de destintado es más eficiente empleando un Jg=0.85 cm/s que uno de 0.5 cm/s.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio experimental llevado a cabo en este trabajo de tesis para establecer la factibilidad de aplicación de la rutina de escalamiento propuesta por Finch y Dobby (1989) [2.19], para el caso específico del uso de columnas de flotación para el destintado de papel, se derivan las siguientes conclusiones:

1. La rutina de escalamiento o diseño de columnas de flotación se puede aplicar al proceso de destintado de papel.
2. La metodología de escalamiento requiere de la determinación experimental de los parámetros de operación de las columnas y de las variables cinéticas.
3. La adición de espumante muestra un efecto en la disminución del tamaño de burbuja al disminuir la tensión superficial de la fase continua. Para este trabajo en particular, al utilizar aceite de pino como surfactante, se observa que adiciones mayores a 40 ppm ($\sigma = 51.7$ dina/cm) no representan variaciones en las características de dispersión.
4. Se demostró que el valor máximo del área superficial de burbujas representa un mayor transporte de masa (partículas de tinta), reflejando en máximos valores de fibra destintada recuperada y en calidad del papel destintado.
5. Este trabajo no incluyó como parte de sus objetivos el uso del agua de lavado en el tope de la columna. Este hecho influyó en el desempeño del proceso al variar el espesor de la zona de espuma.
6. El establecimiento de la profundidad de la capa de espuma dependió del aumento del tiempo de residencia de las fases en la zona de colección, rendimiento de la columna y de la facilidad para “estabilizar” la interfase zona de colección/zona de espuma.
7. Al no haber agua de lavado, la densidad de la espuma se estableció en 0.8 gr/cm^3 , densidades menores repercuten en bajos porcentajes de

remoción de tinta, mientras que densidades mayores no hay formación de la zona de espuma.

8. La determinación experimental del tiempo de residencia de la fase continua en la zona de colección muestra que el proceso de destintado en columnas se comporta como un régimen de mezclado intermedio entre el flujo tipo pistón y el mezclado perfecto.
9. La anterior observación explica la diferencia entre el tiempo de residencia calculado y medido experimentalmente.
10. Se observan mejoras substanciales entre las propiedades del papel periódico y la fibra destintada, en donde las propiedades de la fibra destintada son mejores que las del papel periódico. Las propiedades fueron medidas de acuerdo a las normas y en los laboratorios de la empresa CRISOBA, S. A. de C. V. de S. R. L.
11. Los datos de operación y cinéticos determinados experimentalmente, se utilizaron en el diseño de una columna con dimensiones diferentes, arrojaron las siguientes conclusiones:
 - a) La rutina de escalamiento predice con aceptable diferencia o error (alrededor del 1 %) los parámetros de operación y cinéticos para el escalamiento de columnas para destintado de papel.
 - b) Las recuperaciones experimentalmente obtenidas, siempre fueron mayores a las mínimas calculadas por la rutina de escalamiento.
 - c) Las características de las hojas de papel fabricadas con las fibras destintadas en las dos columnas de flotación son similares.
 - d) La calidad del papel destintado utilizando columnas de flotación permitiría justificar el uso de la fibra destintada en una mezcla a base de fibra de celulosa virgen.
 - e) La aplicación de la rutina de escalamiento es confiable y ofrece una opción de mejora del proceso de destintado actual que se lleva a cabo en celdas de flotación convencionales.

El uso de un mayor porcentaje de fibra reciclada podría ser de trascendental importancia en la preservación del medio ambiente, en especial en lo que toca a la tala de árboles, por lo que para posibles trabajos futuros como recomendaciones se dan las siguientes:

1. Analizar a más profundidad a las fibras de la corriente del concentrado ya que, lo que se observó fue que contenían partículas de tinta adentro de las fibras por lo que eran arrastradas al concentrado, pero coincidentemente todas ellas son fibras demasiado cortas, entonces sería de mucha utilidad investigar por qué las cortas son las que suben al concentrado, es decir si existe la posibilidad de que sean hidrofóbicas o no se mojen independientemente de la tinta que lleven adentro.

REFERENCIAS

1. www.getxo.net
- 1.1. www.papelesnacionales.com.co/conozcanos/comp_ambiente.htm
- 1.2. www.iespana.es/natureduca/activ_reciclaje_papel.htm#principio
- 1.3. J. Glynn Henry y Gary W. Heinke, Ingeniería Ambiental, Segunda Edición, Editorial Prentice may, Traducción M. C. Héctor Javier Escalona y García, Revisión Técnica José Salvador Pantoja M., pag. 579
- 1.4. www.papelnet.cl/papel_diario/reciclaje.htm
- 1.5. C. A. Hardie, G. F. Leichtle, J. A. Finch y C. O. Gómez, "Uso de las técnicas de procesamiento de minerales para el reciclado del papel", (agosto 1998).
- 2.1. AGUILERA DUGARTE A. V., ROJAS O., MOGOLLÓN G., GUTIERREZ I., GOMEZ L., "Formulación de surfactantes y especies alcalinas en el destintado por flotación", Mérida, Venezuela (2002).
- 2.2. VIJAYAKUMAR C VENUGOPAL, "Design of a De-Inking Process for Recycling Mixed Waste Paper"
- 2.3. ZHAO Y., DENG Y., and ZHU J.Y., "Roles of Surfactants in Flotation Deinking", Recycling 101, Progress in Paper Recycling / Vol. 14, No. 1, (November 2004).
- 2.4. MICROSOFT® ENCARTA® 2006 [CD]. Microsoft Corporation, 2005, © 1993-2005, "Papel".
- 2.5. www.icarito.latercera.cl/enc_virtual/c_nat/papel/
- 2.6. www.papelnet.cl/papel_diario/reciclaje.htm
- 2.7. BOBU E. and CIOLACU F., "Reduction Deinking Sludge by Enzyme Treatment, Milano, Italy (2005).
- 2.8. Duke University, Environmental Defense Fund, Johnson & Johnson, McDonald's, The Prudential Insurance Company of America, Time Inc., White paper No. 1 "Functionality requirements for uncoated business papers and effects of incorporating postconsumer content", (December 19, 1995).
- 2.9. FERNANDEZ C., "Soap retention on pulp fibers during recycling: A mechanistic study using a packed bed reactor", Montreal, Quebec, Canada, (December 1996).
- 2.10. www.reciclapapel.org/htm/info/tecnica/tpsodfibras.asp

- 2.11. http://64.233.179.104/translate_c?hl=es&u=http://www.paperonline.org/links/other/other_frame.html&prev=/search%3Fq%3Ddeinking%26start%3D10%26hl%3Des%26lr%3D%26sa%3DN
- 2.12. MICHELOTTI C., y PRANDO R., "Destintado de desechos de papel para la obtención de pulpa de alta calidad". Págs. 15-21 Montevideo, Uruguay (febrero del 2001).
- 2.13. LÓPEZ M. E., "Procedimientos prácticos para la especialidad de pulpa y papel", Facultad de Ingeniería en tecnología de la madera, UMSNH, (2000).
- 2.14. EL-SHALL H., MOUDGIL B. M., and EL-MIDANY A., "Separation of Ink Particles from Waste Paper by Fine-bubbles", Florida, USA, (August 30, 2005).
- 2.15. MICROSOFT® ENCARTA® 2006 [CD]. Microsoft Corporation, 2005, © 1993-2005, "Tinta".
- 2.16. MICROSOFT® ENCARTA® 2006 [CD]. Microsoft Corporation, 2005, © 1993-2005, "Técnicas de impresión".
- 2.17. KIATKAMJORNWONG S., YAMAOKAN T. and MIYAKE Y., "TJTP Research Profile for Imaging Technology", (2002).
- 2.18. LÓPEZ D., VIDAL T., COLOM J. F., TORRES A. L., "Estudio del Destintado de Tintas Flexográficas. Proposición de un modelo experimental", España (2003).
- 2.19. FINCH J. A. y DOBBY G. S., "Column Flotation", Ed. Pergamon Press (1989).
- 2.20. RUBINSTEIN J. B., "Column Flotation Processes, Designs and Practices", Volume Two, Ed. Gordon and Breach Science Publishers, pag ix.
- 2.21. PEKAROVICOVA A., PEKAROVIC J., and FRIMOVA A., "Particle Size of Commercial Inks and Their Deinkability", Kalamazoo, USA (2003).
- 2.22. DRELICH J., PLETKA J., BOYD P., RABER E., HERRON D., LUHTA E., WALQUI H., TERVO N., BOSTON S., WIELAND J., MORGAN J., and SABO N., "Interfacial chemistry aspects of de-inking flotation of mixed office paper". Michigan, USA, (2001).
- 2.23. SENGUPTA D. K., RAO R. B., "Deinking of Indian Newspaper by Agglomerate Flotation" (September, 2004).
- 2.24. www.cannington.bhpbilliton.com/repository/mineralProcessing/Flotation.asp&prev=/search%3Fq%3Dflotation%2Bcolumns%26hl%3Des%26lr%3D%26sa%3DG
- 2.25. TALOQUIMIA, S.A. de C. V., "Información de productos, Esencia de Pino Grado Flotación BO-TQCG-067", Fecha 10/X/02, Control de Calidad.
- 2.26. WHEELER, D. A. "Big flotation column mill tested, E & MJ, 167(II), p.98-99 (1966)

- 2.27. BOUTIN, P. and WHEELER, D. A. "Column flotation", Mining World, 20(3), p.47-50 (1967)
- 2.28. DELL, C. C. and JENKINS, B. W. "The Leeds Flotation Column", Seventh Int. Coal Preparation Congress, Sydney, Australia (A. C. Partridge, ed.) paper J3
- 2.29. YANG, D. C. "New packed column flotation system, in Column Flotation '88" (K. V. S. Sastry, ed.), SME Annual Meeting Phoenix, Arizona, p.257-266 (1988)
- 2.30. ZIPPERIAN, D. E. and SVENSSON, U. "Plant practice of the Flotaire column flotation machine for metallic, nonmetallic and flotation, in Column Flotation '88" (K. V. S. Sastry, ed),SME Annual Meeting Phoenix, Arizona, p.43-54 (1988)
- 2.31. SCHNEIDER, J. C. and VAN WEERT, G "Desing and aperation of the Hydrochem flotation column, in Column Flotation '88" (K. V. S. Sastry, ed),SME Annual Meeting Phoenix, Arizona, p.288-292 (1988)
- 2.32. JAMESON, G. J. "A new concept in flotation column desing, in Column Flotation '88" (K. V. S. Sastry, ed),SME Annual Meeting Phoenix, Arizona, p.281-286 (1988)
- 2.33. TYURNIKOVA, V. I. and NAUMOV, M. E. "Improving the Efficiency of Flotation", Thechnicopy limited, Gloster, England, Chapter 5.2.2 (1981)
- 2.34. McKAY, J. D., Foot, D. G. Jr. and SHIRTS, M. B. "Column flotation and bubble generation studies at the Bureau of Mines, in Column Flotation '88" (K. V. S. Sastry, ed), SME Annual Meeting Phoenix, Arizona, p.173-186 (1988)
- 2.35. WHEELER, D. A. "Column flotation seminar", McGill University, Montreal, Canada, May (1983)
- 2.36. MANQIU XU and FINCH, J. A. "Effect of sparger type and surface area on bubble size flotation cell", Minerals and Metallurgical Processing, 5(1), p.43-44 (1988)
- 2.37. Pyramid Flotation Columns Operation Cycle: www.glv.com
- 3.1. WATSON J. A., GOMEZ C. O. and FINCH J. A. "De-inking recycled paper using column flotation", McGill University, Montreal, Canada, (1996)
- 3.2. SOMORJAI Garbor A., "Introduction of Surface Chemistry and Catalysis", Ed. John Wiley & Sons. Inc. (1994).
- 3.3. LEVENSPIEL, O. "Chemical Reaction Engineering", Wiley, N. Y., (1972).
- 4.1. DOBBY, G. S. and FINCH J. A., "Flotation column scale up and modeling", CIM Bulletin, 79 (1986)
- 4.2. YIANATOS, J. B., ESPINOSA-GOMEZ, R., FINCH, J. A., LAPLANTE, A. R: and DOBBY, G. S., "Effect of column height on flotation column performance, Minerals and Metallurgical Processing (1988)

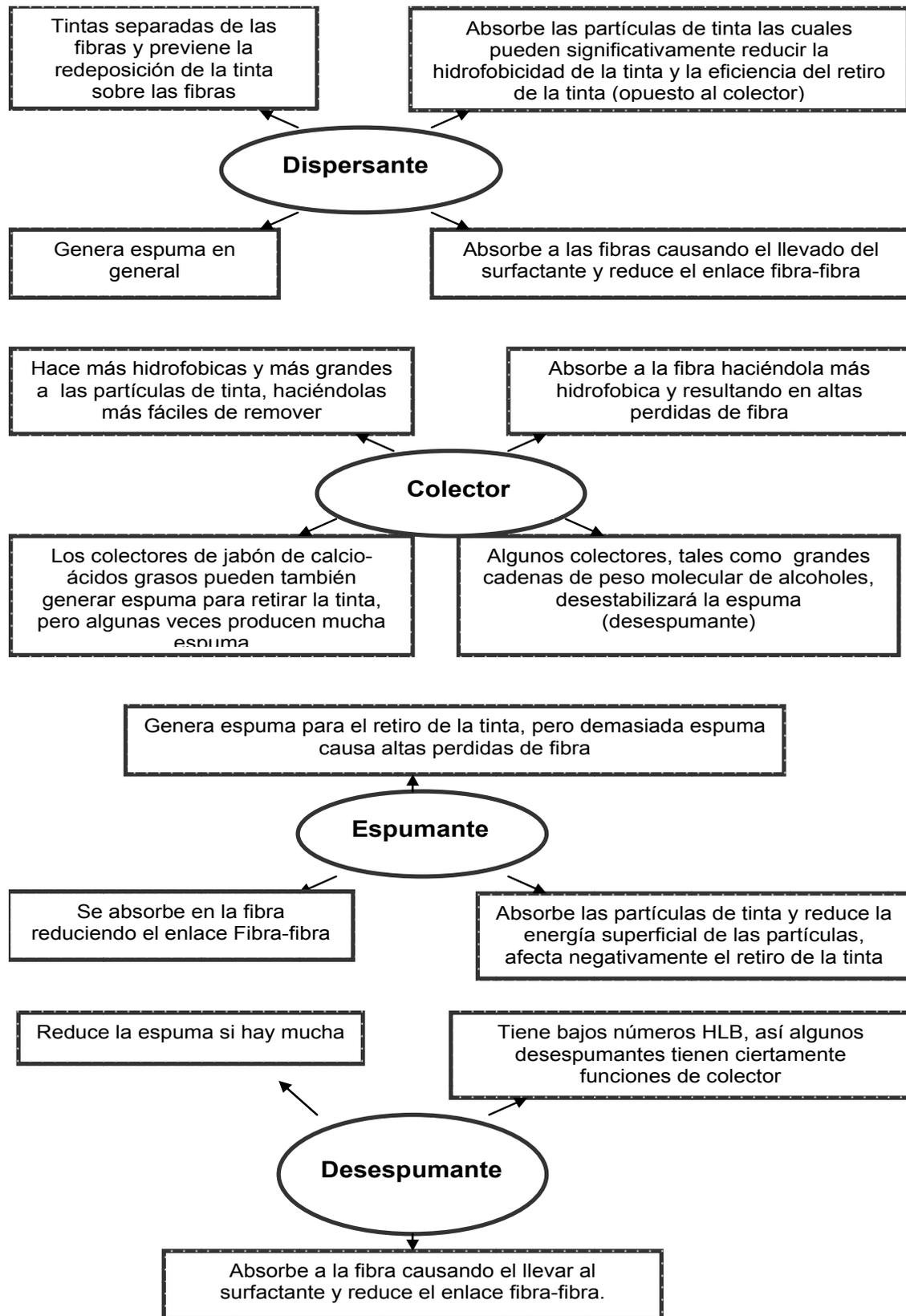
ANEXOS

Anexo A – Atributos afectados por el uso de fibras destintadas y ajustes del proceso.

ATRIBUTO	IMPACTO	AJUSTE DEL PROCESO
Tensión:	En comparación al kraft virgen, en fibras destintadas se reduce su capacidad de enlace durante la formación de las hojas a causa de que estas tienden a endurecerse y tienen menos área disponible para enlazarse. La capacidad de enlace reducida puede conducir a una pérdida en el rasgarse por tensión.	La adición de fibra de Madera blanda y además el refinado durante el proceso de fabricación del papel. Nota: la cantidad de madera blanda que puede ser agregada puede ser limitada porque sus efectos de inclusión pueden afectar otras propiedades tales como suavidad y formación.
Rigidez:	Las fibras destintadas pueden producir unas hojas de contenido reciclado que es menos endurecido que una hoja virgen debido a las fibras destintadas con una capacidad de enlace reducida.	El uso de menos relleno (más fibra) en la pulpa y/o la adición de más fibra de madera blanda para incrementar el enlace. Nota: La adición de relleno también afecta otras propiedades.
Estabilidad dimensional:	En comparación al grado de la madera triturada contenida, pulpa destintada elaborada de periódicos y revistas viejas pueden mejorar la estabilidad dimensional debido a la hidratación y refinado que las fibras destintadas se han sometido. Esto permite a la fibra enlazarse en más lugares y mejora la estabilidad de las hojas. Algunos fabricantes expresan que el destintado de las fibras en una hoja puede no reaccionar uniformemente cuando esta expuesta a la humedad y puede afectar desfavorablemente la estabilidad dimensional.	Caducidad controlada riza y precisa la orientación de la fibra, secado diferencial, y convertido en rizo son procesos que el fabricante de papel puede utilizar para desarrollar la estabilidad dimensional.
Opacidad:	Las fibras destintadas provenientes de revistas y periódicos viejos son más opacas que las fibras vírgenes de madera dura y madera blanda. En general, la presencia de material en una red que resulta en dispersión más luminosa hará las hijas más opacas (por ejemplo, la suciedad presenta esta función).	Las fibras destintadas incrementan la opacidad no representan desafíos para los cuales los fabricantes de papel deben hacer ajustes al proceso. De hecho, se debe requerir menos relleno.
Luminosidad:	Las pulpas destintadas generalmente no tan luminoso como la madera dura virgen y las pulpas de madera suave en una luminosidad máxima; el tipo de pulpa destintada utilizada determina el grado de luminosidad perdida. Por ejemplo, es más fácil de alcanzar una luminosidad comparable con el papel destintado	El fabricante de papel puede dar más luminosidad a la fibra, agregando iluminadores ópticos y rellenos y/o fibra virgen. Nota: El uso de estos rellenos puede afectar otras

	recuperado de oficina que con revistas y periódicos destintados. Sustituyendo la pulpa de papel recuperado de oficina por pulpa de madera triturada también incrementará la luminosidad.	propiedades.
Homogeneidad:	La fabricación de papel con fibras destintadas puede experimentar más el prensado del papel que el papel virgen, porque la fibra destintada más voluminosa resiste el proceso. Además, las fibras destintadas tienen una longitud más corta disponible para llenar los espacios en la superficie de la hoja contribuyendo a homogeneidad.	El fabricante de papel puede permitir usar más prensado del papel si se desea; esta propiedad no posee desafíos para los cuales el fabricante de papel debe hacer ajustes al proceso. Debe notar que un prensado del papel extensivo puede tener efectos perjudiciales sobre otras propiedades tales como la tensión.
Hilado:	Dos características de fibras destintadas pueden llevar a incrementar el hilado. 1. La capacidad reducida de enlace de la fibra destintada puede causar que más fibras se pierdan. 2. La rigidez de las fibras destintadas pueden causarles levantamientos en la superficie de la hoja y ser desprendidas más fácilmente.	Un principal ajuste de tamaño de la superficie y la adición de fibras de madera blanda. Nota: El uso incrementado de Madera blanda puede afectar otras propiedades.
Limpieza:	La presencia de suciedad y adhesivos en la fibra destintada puede resultar en pequeña mancha sobre la hoja o contaminantes en las máquinas del papel, copiadoras y equipo offset.	Una revisión y limpieza adicional y una mejor fuente de recuperación de papel.
Variabilidad de la pulpa destintada:	A causa de la inherente variabilidad en las fuentes de recuperación de papel usado para fibras destintadas, los fabricantes de papel deben hacer ajustes para distribuir con un rango de diferencias en la fuente de la fibra. Los resultados pueden ser producto que es más variable en la calidad proveniente del funcionamiento de la máquina al funcionamiento de la máquina que su equivalente virgen.	Mejores fuentes de recuperación de papel, mejor clasificación e inspección de los suministros, y técnicas de manejo mejoradas.

Anexo B –Papeles de los surfactantes en el destintado por flotación.



Anexo C – Especificaciones y propiedades típicas del espumante esencia de pino grado flotación

Especificaciones

Gravedad Especifica a 25/25 °C	
Min.	0.924
Máx.	0.934
Alcoholes Terciarios Totales, %	
Min.	70.0
Máx.	76.0
Humedad, %Máx.	0.50
Rango de Destilación, °C	
5.0	200.0
95.0	225.0
Índice de Refracción a 20 °C	
Min.	1.478
Máx.	1.488
Color, Apha Máx.	100.0
Punto de Enfriamiento, °C	-10.0

Propiedades Típicas

Gravedad especifica a 20/20 °C	0. 930
Alcoholes Terciarios Totales, %	75.0
Humedad, %	0.35
Rango de Destilación, °C	
5.0	205.0
95.0	230.0
Índice de Refracción a 20 °C	1.482
Color, Apha	70.0
Punto de Inflamación (Setaflash), °C	74.0

- **Precauciones de Manejo de la Esencia de Pino Grado Flotación**

¡ADVERTENCIA! MANTÉNGALO FUERA DEL ALCANCE DE LOS NIÑOS. ES DAÑINO SI ES INGERIDO!. Si es ingerido, no provoque el vomito; llame inmediatamente a un medico, el vomito puede ser dañino. Evite el contacto con los ojos, puede causar daño a los ojos o irritación en la piel, si el contacto con los ojos ocurre, lave con agua inmediatamente: lleve a atención medica lo más pronto posible, no se administre ningún medicamento. Evite la contaminación de los alimentos.

- **Disposición de los Recipientes**

Enjuague los recipientes vacíos con agua y jabón antes de rehusar. No los utilice para almacenar agua para beber.

- **Clasificación C. R. E. T. I. B.**

La Esencia de Pino Grado Flotación es un material peligroso, porque es combustible. Tiene un punto de inflamación de 74 °C (Setaflash).

Anexo D – Datos experimentales de la tensión superficial.

SERIE DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DEL ESPUMANTE

(Utilizando agua sin interfase y variando la concentración de espumante en 20, 40, y 60 ppm de aceite de pino, pH=8)

Rotámetro: de 0-5 Burbujeador: metálico poro=2 μm , h=7.5 cm Columna: Dc=7.5 cm, hc=272 cm, Ac=44.178cm²

COLAS	JI COLAS (cm/s)	COLAS posición	QL COLAS (Lt/min)	QI COLAS (cm ³ /s)
	0.4	6.37	1.06	17.67
ALIMENTACIÓN	Alimentación (cm/s)	Alimentación posición	Alimentación (Lt/min)	Alimentación (cm ³ /s)
	0.679	10	1.8	30

Concentración de Espumante	ROTÁMETRO POSICIÓN	Qg ROTÁMETRO (Lt/min)	Qg ROTÁMETRO (cm ³ /s)	Jg ROTÁMETRO (cm/s)	P1	P2	P3	Eg %(1-3)	db (cm)	sb (cm ² /s)
0 PPM	0	0	0	0				0	0	0
	0.83	1.06	17.67	0.4	258.5	192.5	168.4	0.11	7.20	0.33
	1.67	3.12	35.34	0.8	258.6	192.6	168.4	0.22	11.83	0.40
	2.52	3.18	53.01	1.2	256.6	190.8	167.2	0.67	2.43	2.96
	3.36	4.24	70.68	1.6	253.5	188.5	165.2	1.89	1.13	8.48
	4.21	5.3	88.36	2	246.6	183.1	160.5	4.33	0.52	22.78
20 PPM	0	0	0	0				0	0	0
	0.83	1.06	17.67	0.4	258	192	168	0	7.20	0.33
	1.67	3.12	35.34	0.8	258.5	192.3	168.2	0.33	7.03	0.68
	2.52	3.18	53.01	1.2	252	187.1	164.4	2.67	0.50	14.17
	3.36	4.24	70.68	1.6	231	173	152.1	12.33	0.11	82.20
	4.21	5.3	88.36	2	209	157.5	138.2	21.33	0.08	141.63
40 PPM	0	0	0	0				0	0	0
	0.83	1.06	17.67	0.4	258.6	192.5	168.4	0.22	2.95	0.81
	1.67	3.12	35.34	0.8	258.5	192.5	168.2	0.33	7.03	0.68
	2.52	3.18	53.01	1.2	249	185.1	162.5	3.89	0.31	22.62
	3.36	4.24	70.68	1.6	227.1	170.2	149.5	13.78	0.10	92.47
	4.21	5.3	88.36	2	191	143.5	126	27.78	0.06	180.47
60 PPM	0	0	0	0				0	0	0
	0.83	1.06	17.67	0.4	258.5	192.3	168.3	0.22	2.95	0.81
	1.67	3.12	35.34	0.8	258.5	192.4	168.3	0.22	11.83	0.40
	2.52	3.18	53.01	1.2	248.1	185.1	162.7	5.11	0.22	31.49
	3.36	4.24	70.68	1.6	227	170	149	13.33	0.10	89.33
	4.21	5.3	88.36	2	184.5	139	122.2	30.78	0.05	201.06

Anexo E – Datos experimentales de la velocidad superficial del aire.

SERIE DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LA FRACCIÓN DE GAS

(Utilizando 50 ppm de espumante de aceite de pino, una pulpa de papel de densidad 0.7 y una interfase de 20 cm, pH=8)

Rotámetro: de 0-4.5

Burbujeador: metálico poro=2 μm , h=5 cm

Columna: Dc=7.5 cm, hc=272 cm, Ac=44.178cm²

COLAS	JI COLAS (cm/s)	COLAS posición	QL COLAS (Lt/min)	QI COLAS (cm ³ /s)
	0.4	6.37	1.06	17.67
	W PESO (gr)	V VOLUMEN (cm³)	ρ DENSIDAD (gr/cm³)	
AGUA	30 000	30 000	1	
PAPEL	218.4	299.178	0.73	
PULPA	30 218.4	43169.1	0.7	

Jg						
ROTAMETRO (cm/s)	0.25	0.33	0.45	0.58	0.67	0.85
ROTAMETRO posición	0.85	1.10	1.50	1.90	2.20	2.80
Qg						
ROTAMETRO (Lt/min)	0.67	0.87	1.20	1.52	1.77	2.26
Qg						
ROTAMETRO (cm ³ /seg)	11.16	14.55	19.98	25.41	29.48	37.62
Pos Bomba Alimentación	3.00	3.10	3.00	2.70	3.10	3.00
JI (cm/seg)	0.29	0.34	0.29	0.30	0.34	0.29
QI (Lt/min)	0.77	0.90	0.77	0.79	0.90	0.77
QI (cm ³ /seg)	12.83	15.07	12.83	13.10	15.07	12.83
P1	217.00	217.20	215.70	216.20	214.80	209.50
P2	153.50	217.20	155.50	147.00	152.70	151.50
P3	136.00	135.20	134.40	132.60	132.60	128.50
p1-p3	81.00	82.00	81.30	83.60	82.20	81.00
Dif. De presión	9.00	8.00	8.70	6.40	7.80	9.00
EG 1-3 ($\Delta P/H_p$)*100	14.29	12.70	13.81	10.16	12.38	14.29
m	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
db (cm)	0.0347	0.0435	0.0587	0.0962	0.0924	0.1026
sb	43.66	45.45	46.23	35.86	43.34	49.80

Anexo F – Datos experimentales del nivel de la interfase.

SERIE DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LA ALTURA DE LA INTERFASE

(Utilizando pulpa de papel con una densidad de 0.7 y 50 ppm de espumante de aceite de pino, pH=8)

Rotámetro: de 0-4.5 Burbujeador: metálico poro=2 μ m, h=7.5 cm Columna: Dc=7.5 cm, hc=272 cm, Ac=44.178cm²

COLAS	JI COLAS (cm/s)	COLAS posición	QL COLAS (Lt/min)	QI COLAS (cm ³ /s)	
	0.4	6.37	1.06	17.67	
AIRE	Jg ROTAMETRO (cm/seg)	ROTAMETRO posición	Qg ROTAMETRO (Lt/min)	Qg ROTAMETRO (cm ³ /s)	
	0.85	2.8	2.257	37.619	
AGUA	W PESO (gr)	V VOLUMEN (cm ³)	ρ DENSIDAD (gr/cm ³)		
	30 000	30 000	1		
PAPEL	218.4	299.178	0.73		
PULPA	30 218.4	43169.1	0.7		
NIVEL DE INTERFASE	10 CM	20 CM	30 CM	40 CM	50 CM
Pos Bomba Alimentación	3.60	4.50	3.00	3.50	3.00
Jl (cm/seg)	0.40	0.50	0.33	0.39	0.33
Ql (Lt/min)	1.05	1.32	0.87	1.02	0.87
Ql (cm ³ /seg)	17.54	21.98	14.58	17.05	14.58
P1	117.50	192.50	203.00	186.00	178.00
P2	132.20	99.00	118.00	91.50	122.50
P3	74.00	81.50	106.00	110.00	86.20
p1-p3	43.50	20.00	4.00	14.00	1.80
EG 1-3 ($\Delta P/Hp$)*100	69.05	31.75	6.35	22.22	2.86
EG 1-3 (1- $\Delta P/Hp$)*100	30.95	-76.19	-53.97	-20.63	-45.71
W Concentrado	987.86	1257.45	367.05	964.78	272.35
t Concentrado	2:35,24	01:40,53	9:07,59	5:36,81	4:26,12
Flujo Conc.(gr/min)	381.81	750.49	40.22	171.87	61.40
W Colas	1147.83	1128.67	1100.59	1200.12	1450.26
t Colas	1:02,53	1:02,60	1:01,78	01:05,00	1:27,91
Flujo Colas (gr/min)	1101.39	1081.79	1068.88	1107.80	989.83
W Alimentación	1457.75	1669.92	1184.30	1337.02	1245.14
t Alimentación	1:00,89	0:56,75	1:03,28	01:02,00	1:13,05
Flujo Alim.(gr/min)	1436.44	1765.55	1122.91	1293.89	1022.70
Papel Conc.	4.83	4.22	4.54	5.24	1.53
Papel Colas	7.77	8.19	6.07	8.26	9.43
Papel Alim.	9.13	9.44	6.87	8.98	8.24
W Papel Conc./min	1.87	2.52	0.50	0.93	0.34
W Papel Colas/min	7.46	7.85	5.90	7.62	6.44
W Papel Alim/min	9.00	9.98	6.51	8.69	6.77
RECUPERACIÓN	80.02	75.74	92.31	89.12	94.97
M		3.00	2.00	3.00	2.00
db (cm)		0.07	0.24	0.08	0.63
Sb		78.23	21.24	63.13	8.16

Anexo G – Datos experimentales de la densidad de la pulpa.

SERIE DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE LA PULPA

(Utilizando 50 ppm de espumante de aceite de pino con una altura de la interfase de 30 cm, pH=8)

COLAS	JI COLAS (cm/s)	COLAS posición	QL COLAS (Lt/min)	QI COLAS (cm ³ /s)
	0.4	6.37	1.06	17.67
AIRE	Jg ROTAMETRO (cm/s)	ROTAMETRO posición	Qg ROTAMETRO (Lt/min)	ROTAMETRO Qg (cm ³ /s)
	0.85	2.8	2.257	37.619
DENSIDAD DE PULPA	0.7 gr/cm³	0.8 gr/cm³	0.9 gr/cm³	
W AGUA (gr)	30 000	30 000	30 000	
V AGUA (cm³)	30 000	30 000	30 000	
W PAPEL (gr)	218.4	249.6	280.8	
V PAPEL (cm³)	299.18	341.91	384.65	
Pos Bomba Alimentación	3	2.9	3.5	
Jl (cm/seg)	0.33	0.32	0.39	
Ql (Lt/min)	0.87	0.85	1.02	
Ql (cm³/seg)	14.58	14.09	17.05	
P1	203.00	204.50	201.70	
P2	118.00	122.50	121.00	
P3	117.00	51.00	59.50	
p1-p3	4.00	62.00	52.50	
EG 1-3 (ΔP/Hp)*100	6.35	86.11	64.81	
W Concentrado	367.05	225.03	727.67	
t Concentrado	9:07,59	07:14,04	5:20,22	
Flujo Conc.(gr/min)	40.22	31.11	136.34	
W Colas	1100.59	1446.49	1172.36	
t Colas	1:01,78	1:02,90	1:04,38	
Flujo Colas (gr/min)	1068.88	1379.80	1092.60	
W Alimentación	1184.30	1210.68	2350.25	
t Alimentación	1:03,28	01:04,03	01:00,06	
Flujo Alim.(gr/min)	1122.91	1134.48	2347.90	
Papel Conc.	4.54	2.94	6.33	
Papel Colas	6.07	8.19	8.45	
Papel Alim.	6.87	9.46	10.75	
<i>W Papel Conc./min</i>	0.50	0.41	1.19	
<i>W Papel Colas/min</i>	5.90	7.81	7.88	
<i>W Papel Alim/min</i>	6.51	8.86	10.74	
RECUPERACIÓN	92.31	95.12	86.96	

Anexo H – Datos experimentales del tiempo de residencia.**EXPERIMENTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA**(Utilizando 50 ppm de espumante de aceite de pino con una altura de la interfase de 20 cm, pH=8, $\rho=0.8$)**Rotámetro:** de 0-5 **Burbujeador:** metálico poro=2 μm , h=5 cm **Columna:** Dc=10 cm, hc=405 cm, Ac=78.53cm²

Densidad de la pulpa=	0.7 gr/cm ³
Interfase=	20 cm
Velocidad superficial de las colas (Jt)=	0.4 cm/s
Velocidad superficial de la alimentación (Jf)=	0.49 cm/s
Velocidad superficial del aire (Jg)=	0.85 cm/s
Concentración molar de la solución de KCl=	0.4 m

CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S
8.79E-02	1.64	8.79E-02	31.96	8.79E-02	63.27	0.2862549	94.57999
8.79E-02	2.3	8.79E-02	33.01	8.97E-02	64.31	0.2965088	95.61999
0.0878706	3.02	0.0879097	34.05	8.97E-02	65.36	0.3023739	96.65999
0.0879097	3.95	8.79E-02	35.09	8.97E-02	66.4	0.310606	97.71
8.79E-02	4.83	8.79E-02	36.14	8.97E-02	67.44	0.3182964	98.75
8.79E-02	5.87	8.79E-02	37.18	8.96E-02	68.49	0.332346	99.78999
8.79E-02	6.92	8.79E-02	38.22	9.17E-02	69.53	0.348465	100.84
8.79E-02	7.96	8.79E-02	39.27	9.36E-02	70.57	0.3606415	101.88
8.79E-02	9	8.79E-02	40.31	0.0976038	71.62	0.3706474	102.93
8.79E-02	10.05	8.79E-02	41.35	0.1017089	72.66	0.3850918	103.97
8.79E-02	11.09	8.79E-02	42.4	0.1078692	73.71	0.3908081	105.01
8.79E-02	12.13	8.79E-02	43.44	0.1097627	74.75	0.4051037	106.06
8.79E-02	13.18	8.79E-02	44.48	0.1119838	75.79	0.4208794	107.1
8.79E-02	14.22	8.79E-02	45.53	0.1180511	76.84	0.4347801	108.14
8.79E-02	15.26	8.79E-02	46.57	0.1281748	77.88	0.4469567	109.19
8.79E-02	16.31	8.79E-02	47.62	0.1361694	78.92	0.4630261	110.23
8.79E-02	17.35	8.79E-02	48.66	0.1419983	79.97	0.4772225	111.27
8.79E-02	18.4	8.79E-02	49.7	0.1458931	81.01	0.4914685	112.32
8.79E-02	19.44	8.79E-02	50.75	0.152195	82.05	0.5017701	113.36
8.79E-02	20.48	8.79E-02	51.79	0.1618204	83.1	0.5077858	114.4
8.79E-02	21.53	8.79E-02	52.83	0.1699133	84.14	0.5135537	115.45
8.79E-02	22.57	8.79E-02	53.88	0.1780014	85.18	0.5175438	116.49
8.79E-02	23.61	8.79E-02	54.92	0.1861095	86.22999	0.5214882	117.54
8.79E-02	24.66	8.79E-02	55.96	0.1979017	87.26999	0.5291786	118.58
8.79E-02	25.7	8.79E-02	57.01	0.2141466	88.32	0.5376587	119.62
8.79E-02	26.74	8.79E-02	58.05	0.2261152	89.36	0.5512123	120.67
8.79E-02	27.79	8.79E-02	59.09	0.2342491	90.39999	0.5657082	121.71
8.79E-02	28.83	8.79E-02	60.14	0.2506638	91.45	0.575222	122.75
0.0879097	29.87	8.79E-02	61.18	0.2624455	92.49	0.5853768	123.8
8.79E-02	30.92	8.79E-02	62.23	0.2724018	93.53	0.5932618	124.84

CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S
0.5992775	125.88	0.6897812	177.02	0.651577	228.16	0.5811844	279.29
0.6031723	126.93	0.6875153	178.06	0.6497536	229.2	0.5790673	280.33
0.6073113	127.97	0.6875153	179.11	0.6498032	230.24	0.5773392	281.38
0.6132775	129.01	0.6875153	180.15	0.6456642	231.29	0.5772896	282.42
0.6192398	130.06	0.6875153	181.19	0.6457596	232.33	0.5751725	283.47
0.6232834	131.1	0.6856423	182.24	0.6435433	233.37	0.5752678	284.51
0.627472	132.15	0.6856918	183.28	0.6417198	234.42	0.5732995	285.55
0.6358033	133.19	0.6857872	184.32	0.6396485	235.46	0.5733948	286.6
0.637825	134.23	0.6835213	185.37	0.638958	236.5	0.5715218	287.64
0.6398468	135.28	0.6816483	186.41	0.637825	237.55	0.5696983	288.68
0.6416703	136.32	0.6793823	187.46	0.6358033	238.59	0.5675316	289.73
0.6457596	137.36	0.6794777	188.5	0.6359024	239.63	0.5675316	290.77
0.6497536	138.41	0.6776047	189.54	0.6340294	240.68	0.5633393	291.81
0.6514321	139.45	0.6757317	190.59	0.6296425	241.72	0.5613671	292.86
0.6575928	140.49	0.6754875	191.63	0.627472	242.77	0.5614662	293.9
0.6616821	141.54	0.6737099	192.67	0.6275215	243.81	0.5591507	294.94
0.6636048	142.58	0.6737595	193.72	0.6256981	244.85	0.5591507	295.99
0.6660233	143.63	0.6735153	194.76	0.6232834	245.9	0.5614662	297.03
0.6676483	144.67	0.6755371	195.8	0.6213608	246.94	0.5615158	298.08
0.6697197	145.71	0.6754875	196.85	0.6214104	247.98	0.5591011	299.12
0.6715927	146.76	0.675438	197.89	0.6192894	249.03	0.5591507	300.16
0.6736641	147.8	0.6775055	198.94	0.619339	250.07	0.5573273	301.21
0.6775551	148.84	0.6775551	199.98	0.6175156	251.11	0.5562401	302.25
0.6775055	149.89	0.6775055	201.02	0.6153946	252.16	0.5552559	303.29
0.6794777	150.93	0.6775551	202.07	0.6132775	253.2	0.5534325	304.34
0.6794281	151.97	0.6775055	203.11	0.6132775	254.25	0.5512619	305.38
0.6817475	153.02	0.6753388	204.15	0.6133728	255.29	0.5492401	306.42
0.6835213	154.06	0.6753883	205.2	0.613472	256.33	0.5493393	307.47
0.6856423	155.1	0.6735153	206.24	0.6112061	257.38	0.547123	308.51
0.6875153	156.15	0.671444	207.28	0.6114045	258.42	0.5454445	309.56
0.6855926	157.19	0.6736641	208.33	0.6094818	259.46	0.5431786	310.6
0.6834221	158.24	0.6713944	209.37	0.6073113	260.51	0.5431786	311.64
0.6815987	159.28	0.671444	210.41	0.6055375	261.55	0.5414048	312.69
0.6835213	160.32	0.6696701	211.46	0.6032677	262.59	0.5392838	313.73
0.6857376	161.37	0.6696701	212.5	0.6032677	263.64	0.5376587	314.77
0.6856423	162.41	0.6676483	213.55	0.6014938	264.68	0.5376091	315.82
0.6875153	163.45	0.6659241	214.59	0.6013946	265.72	0.5354881	316.86
0.6897316	164.5	0.6636543	215.63	0.5992775	266.77	0.5334168	317.9
0.6917038	165.54	0.6635094	216.68	0.5973549	267.81	0.5334168	318.95
0.691555	166.58	0.6616821	217.72	0.5951348	268.86	0.53125	319.99
0.6916046	167.63	0.6594162	218.76	0.5951843	269.9	0.5312996	321.03
0.6916542	168.67	0.6594162	219.81	0.5933113	270.94	0.5294266	322.08
0.6917038	169.71	0.6576424	220.85	0.5932618	271.99	0.5295258	323.12
0.691555	170.76	0.6554222	221.89	0.5910454	273.03	0.527256	324.17
0.6916542	171.8	0.6534996	222.94	0.5911408	274.07	0.5273056	325.21
0.6896325	172.85	0.6535492	223.98	0.5891228	275.12	0.525383	326.25
0.6897316	173.89	0.6514321	225.02	0.5872002	276.16	0.525383	327.3
0.6897316	174.93	0.6514778	226.07	0.5853271	277.2	0.5255318	328.34
0.6897316	175.98	0.6514778	227.11	0.583107	278.25	0.5255318	329.38

CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO, S
0.5233117	330.43	0.4791451	372.17	0.4470043	413.91	0.4109211	455.66
0.5233117	331.47	0.4772721	373.21	0.4469567	414.96	0.4110203	456.7
0.5234108	332.51	0.4772721	374.26	0.4451313	416	0.4109211	457.74
0.5215378	333.56	0.4772721	375.3	0.4450836	417.04	0.4090977	458.79
0.5216866	334.6	0.475153	376.34	0.4431114	418.09	0.4091473	459.83
0.5193711	335.64	0.4752522	377.39	0.4431114	419.13	0.4091473	460.87
0.5175438	336.69	0.4733296	378.43	0.4413853	420.18	0.4091473	461.92
0.5174942	337.73	0.473526	379.48	0.4413357	421.22	0.4091473	462.96
0.5154267	338.78	0.4734268	380.52	0.4414349	422.26	0.4092445	464.01
0.5136032	339.82	0.4734268	381.56	0.4391175	423.31	0.4091473	465.05
0.5136986	340.86	0.471159	382.61	0.439167	424.35	0.4091473	466.09
0.5117302	341.91	0.4713574	383.65	0.4372444	425.39	0.4069786	467.14
0.509758	342.95	0.469286	384.69	0.4372444	426.44	0.4069786	468.18
0.5078354	343.99	0.4671173	385.74	0.4371948	427.48	0.406929	469.22
0.5061074	345.04	0.4671173	386.78	0.4350262	428.52	0.406929	470.27
0.5062561	346.08	0.4668713	387.82	0.4349766	429.57	0.4069786	471.31
0.5037918	347.12	0.4653435	388.87	0.4351254	430.61	0.406929	472.35
0.5017205	348.17	0.4652443	389.91	0.4332028	431.65	0.4069786	473.4
0.4995041	349.21	0.4653435	390.95	0.4331036	432.7	0.406929	474.44
0.4995041	350.25	0.4610043	392	0.433054	433.74	0.406929	475.48
0.4976311	351.3	0.4610539	393.04	0.4308357	434.79	0.406929	476.53
0.4976311	352.34	0.4611035	394.09	0.4307385	435.83	0.406929	477.57
0.4953633	353.39	0.4588852	395.13	0.4289627	436.87	0.406929	478.62
0.4954129	354.43	0.4589844	396.17	0.4269429	437.92	0.406929	479.66
0.4954129	355.47	0.4572087	397.22	0.4268437	438.96	0.406929	480.7
0.4935398	356.52	0.4571591	398.26	0.4250202	440	0.406929	481.75
0.4914685	357.56	0.4571591	399.3	0.4251671	441.05	0.406929	482.79
0.4895458	358.6	0.4571591	400.35	0.4227524	442.09	0.4069786	483.83
0.4872799	359.65	0.4571591	401.39	0.4228516	443.13	0.4049568	484.88
0.4873276	360.69	0.45504	402.43	0.4208794	444.18	0.4050064	485.92
0.4872799	361.73	0.4530201	403.48	0.4209767	445.22	0.405056	486.96
0.4872799	362.78	0.4530678	404.52	0.4209767	446.26	0.405056	488.01
0.4853573	363.82	0.4508991	405.56	0.4187584	447.31	0.4050064	489.05
0.4853573	364.87	0.4508991	406.61	0.4187584	448.35	0.405056	490.1
0.4854546	365.91	0.4510479	407.65	0.4168854	449.4	0.405056	491.14
0.4854069	366.95	0.4490757	408.7	0.4169846	450.44	0.405056	492.18
0.4831391	368	0.4509983	409.74	0.416935	451.48	0.405056	493.23
0.4831391	369.04	0.4491253	410.78	0.4128437	452.53	0.4050064	494.27
0.4813633	370.08	0.4491253	411.83	0.4129925	453.57	0.4048576	495.31
0.4790955	371.13	0.4491253	412.87	0.4108715	454.61		

Anexo I – Datos experimentales de la máxima recuperación variando el Jg.

SERIE DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LA RECUPERACION VARIANDO LOS Jg'S

(Utilizando 50 ppm de espumante de aceite de pino con una altura de la interfase de 20 cm, pH=8, $\rho=0.8$)

Rotámetro: de 0-5, Burbujeador: metálico poro=2 μ m, h=5 cm Columna: Dc=7.5 cm, hc=272 cm,

Ac=44.178cm²

Jg, cm/s	0.2 cm/s	0.4 cm/s	0.5 cm/s	0.6 cm/s	0.8 cm/s	1.0 cm/s	1.2 cm/s
W AGUA (gr)	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
V AGUA(cm3)	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
W PAPEL (gr)	249.6	249.6	249.6	249.6	249.6	249.6	249.6
VPAPEL(cm3)	341.91	341.91	341.91	341.91	341.91	341.91	341.91
Pos Bomba Alimentación	4	4	3.5	4	4	5	5
Jl (cm/seg)	0.44	0.44	0.39	0.44	0.44	0.55	0.55
Ql (Lt/min)	1.17	1.17	1.02	1.17	1.17	1.47	1.47
Ql (cm3/seg)	19.52	19.52	17.05	19.52	19.52	24.45	24.45
P1	210.50	216.00	223.50	184.00	193.00	187.50	130.00
P2	151.50	156.00	92.00	145.50	138.00	129.50	138.10
P3	130.50	134.50	129.20	126.50	121.00	111.50	114.10
p1-p3	10.00	8.50	4.30	32.50	18.00	14.00	74.10
EG 1-3 ($\Delta P/Hp$)*100	13.89	11.81	5.97	45.14	25.00	19.44	102.92
W(gr) Concen.	480.00	860.00	328.49	650.00	760.00	740.00	730.00
T Concentrado	1:14,78	02:54,46	9:53,78	00:53,63	0:53,66	00:43,59	00:40,75
Flujo C(gr/min)	385.13	295.77	33.19	727.20	849.80	1018.58	1074.85
W Colas	1430.00	1450.00	1354.95	1270.00	1400.00	1360.00	1240.00
T Colas	1:16,04	1:16,15	1:11,93	01:15,69	01:16,66	01:16,40	01:16,53
Flujo T (gr/min)	1128.35	1142.48	1130.22	1006.74	1095.75	1068.06	972.17
W Alimentación	2110.00	1850.00	1267.05	2140.00	2200.00	2380.00	2630.00
T Alimentación	1:17,62	01:18,56	01:06,00	01:15,47	01:17,46	01:05,68	01:15,32
Flujo F(gr/min)	1631.02	1412.93	1151.86	1701.34	1704.11	2174.18	2095.06
Papel Conc.	1.20	2.41	2.28	3.30	3.23	4.30	4.15
Papel Colas	10.83	9.75	9.00	9.66	9.42	9.59	9.47
Papel Alim.	14.80	11.17	8.80	13.63	13.79	15.69	17.54
W Papel							
Conc.gr/min	0.96	0.83	0.23	3.69	3.61	5.92	6.11
W Papel Colas							
gr/min	8.55	7.68	7.51	7.66	7.37	7.53	7.42
W Papel Alim							
gr/min	11.44	8.53	8.00	10.84	10.68	14.33	13.97
RECUPERACIÓN	74.70	90.05	93.84	70.67	69.02	52.55	53.14
m	2	2	2	2	2	2	-
Db	0.03	0.06	0.15	0.03	0.06	0.09	-
Sb	40.96	38.99	20.19	131.52	78.52	64.14	

Anexo J – Datos experimentales del escalamiento.

EXPERIMENTOS DE ESCALAMIENTO VARIANDO LOS Jg'S

(Utilizando 50 ppm de espumante de aceite de pino con una altura de la interfase de 30 cm, pH=8, $\rho=0.8$)

Rotámetro: de 0-4.5 Burbujeador: metálico poro=2 μ m, h=5 cm Columna: Dc=10 cm, hc=405 cm, Ac=78.53cm²

Jg, cm/s	0.5 cm/s	0.85 cm/s
nota: el JI de las colas fue de 0.35 en ambos casos		
	50 000	50 000
V AGUA(cm ³)	50 000	50 000
W PAPEL (gr)	403.23	403.23
VPAPPEL(cm ³)		
Pos Bomba Alimentación	5.00	4.80
JI (cm/s)	0.31	0.30
QI (Lt/min)	1.47	1.41
QI (cm ³ /s)	24.45	23.47
P1		
P2	110.00	120.00
p1-p2		
EG 1-2 ($\Delta P/H\rho$)*100	0.00	0.00
EG 1-2 ($(1-\Delta P/H\rho)$ *100)	194.18	202.74
W(gr) Concen.	893.11	1003.22
t Concentrado	02:46,24	04:18,41
t Concentrado (seg)	166.24	258.41
Flujo C(gr/min)	322.34	232.94
W Colas	1454.39	1011.91
t Colas	00:41,87	00:30,00
t Colas (s)	41.87	30.00
Flujo T (gr/min)	2084.15	2023.82
W Alimentación	1597.59	1663.06
t Alimentación	00:41,62	00:45,00
t Alimentación (seg)	41.62	45.00
Flujo F(gr/min)	2303.11	2217.41
Papel Conc. gr	8.09	7.18
Papel Colas gr	8.63	6.56
Papel Alim. Gr	9.90	10.66
W Papel Conc.gr/min	2.92	1.67
W Papel Colas gr/min	12.37	13.12
W Papel Alim gr/min	14.27	14.21
Concentrado	0.91	0.72
Colas	0.59	0.65
Alimentación	0.62	0.64
RECUPERACIÓN	86.65122686	92.30769231