



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ZARAGOZA"**

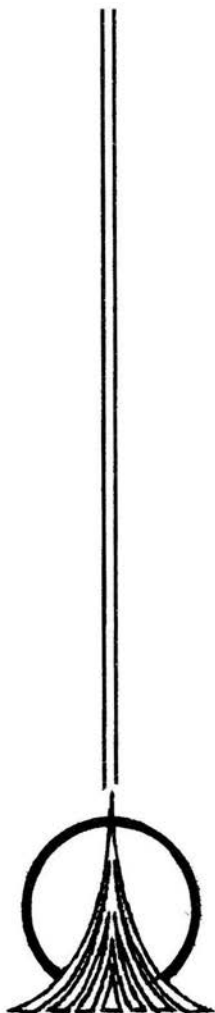
**"ESTUDIO DE LOS MÉTODOS Y/O TÉCNICAS PARA  
EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN LA  
INDUSTRIA PAPELERA (PROCESO KRAFT)"**

SEMINARIO DE TITULACIÓN  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**  
P R E S E N T A :  
MIRIAM VEGA LOYOLA

A S E S O R :  
I.Q. JOSÉ MARIANO RAMOS OLMOS

MÉXICO, D.F.

2004





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/025/04**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNA: VEGA LOYOLA MIRIAM**  
**P r e s e n t e.**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

|                    |   |
|--------------------|---|
| <b>Presidente:</b> | <b>I.Q. Miguel José Flores Galaz</b>        |
| <b>Vocal:</b>      | <b>I.Q. José Mariano Ramos Olmos</b>        |
| <b>Secretario:</b> | <b>Biol. María Eugenia Ibarra Hernández</b> |
| <b>Suplente:</b>   | <b>I.Q. Margarito Coronado Maldonado</b>    |
| <b>Suplente:</b>   | <b>I.Q. Dominga Ortiz Bautista</b>          |

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**  
México, D. F., 13 de Mayo de 2004

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**M. en C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA**



## AGRADECIMIENTOS.

*«El verdadero propósito de la educación; no es que el hombre y la mujer cultos puedan ganar dinero o conseguir un puesto elevado, ni siquiera el propio engrandecimiento. Su fin es ensanchar el espíritu, ampliar la mente, estimular la percepción y capacidad de asombro, dar una visión y comprensión nuevas del mundo, excitar el intelecto y despertar las facultades dormidas para satisfacción del que las posee. En resumen revelar nuevas perspectivas de conocimiento y comprensión a fin de incrementar la dicha de vivir.»*

Aspasia.

Deseo agradecer profundamente a la UNAM y en especial a la F.E.S. Zaragoza por abrirme las puertas al conocimiento y brindarme las bases que hicieron posible la elaboración del presente trabajo.

Gracias a mi asesor I.Q. Mariano Ramos Olmos, por su tiempo y conocimiento para guiarme en la realización de este trabajo.

Con eterna gratitud a mis maestros que contribuyeron realmente a mi formación.

## DEDICATORIAS.

A mis padres; Josafat Vega Reyes e Inés Loyola Lara, porque gracias a su apoyo y consejo he llegado a realizar una de mis metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir, para continuar con mi superación. Además de ser ejemplo a seguir y guía. Con mi eterno agradecimiento, Admiración Cariño y Respeto.

A mis hermanos; Edgar, Juan Josafath, Mirna e Inés Jessie, por ser cada uno de ellos parte importante en mi vida, gracias por su cariño incondicional y porque han sido mi soporte en todo momento.

A todas aquellas personas con las que he compartido etapas y momentos de mi vida, y que me han brindado su amistad.

***Miriam.***

## INDICE

| Contenido  | Página |
|--|--------|
| <b>CAPITULO I</b>  |        |
| Introducción.  | 1      |
| 1.1 Antecedentes históricos.   | 2      |
| 1.2 Procesos para la fabricación del papel.                                  | 8      |
| 1.2.1 Clasificación del papel.   | 14     |
| 1.2.2 Ciclo sostenible del papel.  | 18     |
| 1.3 Contaminación del agua en la industria papelera.                         | 20     |
| 1.3.1 Usos del agua en la industria papelera.                                | 29     |
| 1.4 Marco Legislativo  | 31     |
| 1.4.1 Normas Oficiales Mexicanas (NOM's)                                     | 33     |
| <b>CAPITULO II</b>   |        |
| 2.1 Procesos de obtención de pulpa.  | 35     |
| 2.2 Métodos de blanqueo para la pulpa.                                       | 48     |
| 2.3 Proceso Kraft o Sulfato.   | 54     |
| <b>CAPITULO III</b>  |        |
| 3.1 Tratamiento de aguas.  | 63     |
| 3.2 El agua para la fabricación del papel.                                   | 67     |
| 3.2.1 Cantidad de agua utilizada en los procesos para la obtención de pulpa. | 72     |
| 3.3 Contaminantes presentes en el agua del proceso Kraft.                    | 75     |
| 3.4 Recirculación del agua en la fabricación del papel.                      | 81     |
| 3.5 Tratamiento de los efluentes en el proceso Kraft.                        | 86     |
| <b>CAPITULO IV</b>   | 105    |
| Conclusiones.  |        |
| <b>CAPITULO V</b>  |        |
| Bibliografía   | 107    |
| Glosario   | 111    |

## INDICE DE TABLAS

| No. Tabla | Contenido   | Página |
|-----------|---|--------|
| 1.1       | Aplicaciones del agua en la fabricación del papel.                            | 30     |
| 1.2       | Normas Oficiales Mexicanas aplicables a las descargas de aguas residuales.    | 34     |
| 2.1       | Clasificación de los procesos de producción de la pulpa.                      | 44,45  |
| 2.2       | Condiciones típicas para blanquear pulpa Kraft.                               | 49     |
| 3.1       | Especificaciones para la composición del agua de proceso.                     | 72     |
| 3.2       | Uso de agua (flujo efluente) de la manufactura de productos de pulpa y papel. | 73     |
| 3.3       | Consecuencias de los circuitos cerrados del sistema de aguas.                 | 80     |
| 3.4       | Métodos de desinfección.  | 102    |

## INDICE DE FIGURAS

| No. de Figura | Contenido   | Página |
|---------------|---|--------|
| 1.1           | Proceso de elaboración de la celulosa y papel.              | 12     |
| 1.2           | Pirámide del reciclaje del papel.                           | 20     |
| 2.1           | Sistemas acuosos de obtención de pulpas.                    | 43     |
| 2.2           | Etapa de cocción del proceso kraft.                         | 57     |
| 2.3           | Etapa de blanqueo del proceso kraft.                        | 60     |
| 3.1           | Porcentaje de agua reciclada en la máquina de papel.        | 84     |
| 3.2           | Diagrama del agua utilizada en el proceso kraft.            | 87     |
| 3.3           | Proceso de eliminación del color por coagulación de la cal. | 94     |
| 3.4           | Tratamiento de efluentes en el proceso kraft.               | 103    |



## Objetivos.

---

1. Establecer la importancia de la industria papelera en cuestión de consumo y contaminación del agua que utiliza en sus procesos (Kraft).
2. Exponer el tipo de tratamientos y/o métodos que se pueden aplicar a este tipo de aguas residuales para que cumplan con los límites aceptables que establece la normatividad mexicana.

# CAPITULO I

## Introducción.

---

La contaminación de cuerpos de agua ha venido creciendo en la actualidad provocando deterioro en las aguas superficiales y subterráneas, esto debido al aumento de la actividad industrial y agrícola. Hoy en día, las exigencias para el suministro de agua son muchas, para ello los ingenieros, se han encargado de producir aguas bien tratadas, pero quizá el campo que ha representado mayor reto en la práctica de la ingeniería en esta época es el tratamiento y la eliminación de los residuos industriales y peligrosos en el agua.

Hay que hacer énfasis en que muchos de los problemas relacionados con la contaminación del agua a los cuales se tienen que enfrentar los ingenieros serán resueltos minimizando la cantidad de los materiales producidos y utilizados, mediante la sustitución de productos, recuperación, reciclaje y la reducción al mínimo de las sustancias químicas. Un **axioma** generalmente aceptado es que resulta mucho más económico prevenir la contaminación que eliminarla.

En la fabricación de celulosa y papel por medio del proceso kraft (este proceso es el más importante, ya que ha llegado a dominar la producción total de la pulpa a nivel mundial), el principal empleo del agua lo constituye su uso como medio de dispersión y transporte de las materias primas fibrosas y de los aditivos, a través de las etapas del proceso de producción, que van desde el pulpeo hasta la formación. El agua se utiliza también como fluido de intercambio de calor, para el sellado de los sistemas a vacío, para la producción de vapor, como agente lubricante, y muchas aplicaciones más.

La Industria papelera al igual que cualquier actividad industrial produce un impacto sobre el medio ambiente, que debe ser minimizado para hacer compatible el desarrollo económico con la conservación de la naturaleza, en este sentido, esta industria es probablemente uno de los sectores mejor posicionados para cumplir con los requerimientos del desarrollo sostenible: la materia prima es renovable, los productos son reciclables y los sofisticados procesos de producción están en continua evolución en busca de las tecnologías más respetuosas con el medio ambiente.

El desarrollo del presente trabajo esta enfocado a establecer las bases necesarias para tratar la problemática de los efluentes del proceso kraft, en la obtención de celulosa y papel, considerando que la industria papelera es una de las principales consumidoras de agua y como consecuencia una de las mayores generadoras de contaminantes, se establece la estructura del trabajo de la siguiente manera.

En el capítulo I, se establecieron las generalidades, tales como, antecedentes históricos, la importancia del papel, el ciclo sostenible de papel, así como el tipo de contaminantes que están presentes en el agua de proceso de producción de la celulosa, pulpa y papel, además del marco legislativo vigente en materia de aguas residuales.

En el capítulo II, se describen los diferentes tipos de procesos más importantes para la producción de pulpa y papel, estableciendo las ventajas que tiene el proceso kraft sobre los demás, así como también los métodos de blanqueo que más se aplican en esta industria y su aporte como una de las principales etapas en donde se genera el mayor grado la contaminación de los efluentes.

Finalmente en el capítulo III, se establecen los principales contaminantes presentes en los efluentes del proceso kraft, así como los diferentes tratamientos que se aplican para poderlas vertir a los cuerpos de agua, y cumplir con las normas correspondientes. En función de lo anterior se propone un tren de tratamiento, el cual consta de cinco etapas, desde un sistema DAF, hasta la desinfección.

## 1.1 Antecedentes Históricos.

---

Después de la expresión oral, la escritura es el principal instrumento de comunicación entre los hombres, permitiendo la supervivencia de su pensamiento a través del tiempo y del espacio. Cuando la humanidad quiso entenderse por medio de las imágenes y la escritura, tuvo que recorrer un difícil camino, hasta llegar al descubrimiento de un soporte de fácil obtención y almacenamiento, barato, duradero e idóneo para poder plasmar sus inquietudes y conocimientos: el papel. Tres etapas de seiscientos años caracterizan su historia: seiscientos años de ocultación por parte de sus inventores, los chinos, seiscientos años de migración hasta su introducción en la cultura europea, y otros seiscientos años hasta llegar al invento de la máquina de papel continuo, que marca el inicio de la etapa actual.

El invento del papel proporcionó al hombre un soporte fiel donde habitara la memoria escrita en su recorrido a través de la historia, y gracias a su consistencia y durabilidad, los textos de nuestros antepasados siguen siendo, en la actualidad, un testigo fiel de su tiempo. La divulgación de la información y conocimientos, al que ha llegado la humanidad, no hubiera sido posible sin la invención del papel y la imprenta.

El lenguaje gráfico fue perfeccionándose desde el símbolo o jeroglífico hasta los signos que representan los sonidos, es decir, el alfabeto. La dificultad del empleo de este lenguaje radicaba en el soporte del mismo, que en principio fue la piedra, la madera, los metales o la arcilla. Tuvieron que pasar miles de años hasta que la humanidad encontró materiales más apropiados para sus inscripciones, como el papiro y el pergamino y, finalmente, el papel.

El pergamino es una piel de animal, sin curtir, sin pelo y limpia, macerada en cal y satinada. En Egipto, el pergamino se usaba a mediados del segundo milenio antes de J.C. Debe su nombre a Pergamon, ciudad de Asia Menor, donde artesanos especializados lograron mejorar considerablemente su calidad e incrementar la fabricación. Fue un soporte de gran prestigio durante toda la Edad Media.

El "papyrus" lo obtenían los egipcios de la médula del tallo del papiro que crece espontáneamente en las orillas del río Nilo. Una vez cortada en tiras largas y delgadas, se colocaban una al lado de la otra, y encima otras en sentido perpendicular. La hoja, así formada, se prensaba y golpeaba con un mazo para obtener un grueso uniforme. La utilización del papiro terminó, en parte, por la invasión árabe que paralizó el tráfico entre Oriente y Europa y por la competencia del pergamino, de mayor resistencia y durabilidad, iniciada en el siglo II.

El papel comienza en China, la cual ofreció a la humanidad un material donde se podía escribir, de bajo costo y alta permanencia, que en poco tiempo fue sustituyendo al papiro y al pergamino, con los que convivió en sus inicios. Aunque tenemos conocimientos de la existencia del pseudo papel desde el año 98 A.C., según la tradición, la historia del papel se inicia en el año 105, cuando el chambelán de la corte Ts'ai Lun ofreció al emperador Hai una blanca hoja de papel.

La innovación de Ts'ai Lun fue la desintegración de las fibras vegetales y trapos con un mazo pesado de madera en un mortero de piedra, la forma del papel se realizaba utilizando un marco de madera, en el que se sujetaba un tejido fino de bambú, unido con hilos de seda. Como materia cohesiva para unir las fibras y dar la impermeabilidad necesaria, se aplicó un extracto de agar (alga marina) que ya se usaba en China, con fines medicinales, desde tiempos remotos. Desconocemos de qué materiales estaban hechas estas primitivas hojas de papel: lino, esparto, cáñamo. Es de suponer que conociendo los capullos de seda, estudiarían la base de alimentación de los gusanos, es decir la hoja de morera de la que tal vez obtendrían la primera pasta de papel.

El paso de papel de Oriente a Occidente se lo debemos a los árabes, en el año 751, durante la expedición árabe hacia la frontera China, el gobernador militar del califato de Bagdad capturó en Samarkanda, tras la batalla de Telas, dos fabricantes de papel. Con su ayuda construyó un molino papelero en esta ciudad, localidad propicia para ello, ya que tenía mucha agua, canales de regadío y campos de lino y cáñamo. Los árabes tienen el mérito indiscutible de haber extendido la fabricación del papel en su vasto imperio hasta España.

Es evidente que la posesión del papel fomentó, en el imperio islámico, la cultura de escribir, la instrucción pública, la erudición y la literatura en un tiempo en que Occidente tenía que valerse del pergamino, como único material para la escritura. Así gran parte de la cultura clásica llegó a Europa a través del papel árabe. Los grandes avances introducidos por los árabes, en la técnica de la fabricación del papel fueron: la utilización de la energía hidráulica, el blanqueo de las fibras con cal, el encolado con goma arábiga o engrudo de almidón y perfeccionamiento de la forma papelera. Las materias primas utilizadas eran el ramio, el lino y el cáñamo.

El papel se extiende por Europa gracias a España y por los movimientos migratorios de los cruzados que lo trajeron directamente desde Oriente; sobre todo, italianos y provenzales que comerciaban con Bagdad y Damasco. Los primeros molinos europeos los encontramos en la cuenca del Mediterráneo, destacando, aparte de los españoles, los de Italia y Francia. La primera cita de un molino papelerero italiano lo sitúa en 1276. Italia fue una importantísima potencia papelera, introduciendo grandes mejoras en su fabricación, como el empleo de mazos, la utilización de cola animal y la invención de la filigrana (hilo de plata o latón, con una silueta determinada y que podía observarse en la hoja de papel a contraluz); por su parte, el primer molino francés está fechado en la segunda mitad del siglo XIII. Pronto, los productos franceses entran en competencia con los mejores papeles de Italia, gozando las manufacturas de ambos países de gran prestigio durante los siglos XVI y XVII.

Esperaron hasta fines del siglo XIV para encontrar molinos papeleros en Centro-Europa, donde más tarde, gracias a la invención de la imprenta, gozaron de una enorme expansión; así el primer molino alemán fue en 1390 y el de Bélgica data de 1405, en Suiza existieron molinos de papel desde el año 1411 y en Austria en 1498. Aunque se sabe que existieron molinos de papel en Inglaterra y Holanda desde fines del siglo XV y XVI, respectivamente, su gran desarrollo lo obtuvieron en los siglos XVII y XVIII, sobre todos los holandeses, debido a la inmigración de los papeleros franceses, a los avances técnicos y a la influencia del papel japonés.

La producción de papel fue introducido por primera vez en el continente americano, por los españoles, cerca de la Ciudad de México alrededor del año 1580. Antes de la llegada de los españoles el papel fue utilizado por los Mayas y los Aztecas, de forma semejante,

los Hawaianos producían papel suave el cual sacaban de la corteza de los árboles de higo o mora. Esta técnica se usa todavía en algunas etnias indígenas del sureste de México.

En 1440, Johann Gutenberg, de Maguncia, inventa el arte tipográfico, con el que se puede componer textos de cualquier extensión y obtener gran cantidad de copias. La imprenta dio una verdadera medida del valor y utilidad del papel ya que reunía, además de sus cualidades gráficas, el ser abundante, barato (costaba la décima parte que el pergamino), duradero, transportable y accesible a las enormes cantidades que requerían los impresores.

Hasta estos momentos el papel era de uso restringido, alternando con el pergamino. Pero debido a que los libros podían ser editados en grandes cantidades, hubo más ansia de saber, mas hombres aprendieron a leer y escribir y al cabo de pocos decenios toda la vida espiritual y cultural alcanzó un total resurgimiento. Además, el descubrimiento de nuevas tierras y vías marítimas amplió los horizontes, aumentándose las relaciones comerciales.

Debido al creciente consumo del papel, la obtención de materias primas, que era casi exclusivamente de trapos viejos, empezó a constituir un serio problema, creándose una enorme desproporción entre la oferta y la demanda. Hay informes de todos los países sobre continuos conflictos entre papeleros y traperos. Muchos soberanos decretaron prohibiciones de exportación para proteger su industria. Por ello, ya desde el siglo XVII, se trabajaba en la obtención de nuevas fibras papeleras. El naturista francés Réamur entregó, en 1719, un informe a la Real Academia de Ciencias de París sobre la forma en que las avispas elaboran sus nidos con un papel obtenido con fibras vegetales e impermeable al agua. El alemán Jacobo Christian Shaeffer, entre 1765 y 1771, estudió la obtención de papel a partir de varios vegetales: vello de álamo, musgo, abeto, ortigas, cardo, etc; aunque no consiguió la fabricación de papeles blancos para escribir, demostró que estos materiales eran utilizables. A pesar de la escasez de materias primas, que fue cada vez mas creciente, tuvieron que pasar ciento veinticinco años, desde los primeros estudios, hasta encontrar un nuevo material idóneo para la obtención del papel: *la madera*, en 1844.



La primera máquina efectiva fue construida en 1798 por el inventor francés Nicholas Louis Robert, esta máquina fue mejorada por dos papeleros británicos, los hermanos Henry y Sealy Fourdrinier, en 1803. El problema de la fabricación del papel a partir de una materia prima barata se resolvió con la introducción del proceso de trituración de la madera para fabricar pulpa en 1844, y el primer proceso químico 10 años después. De aquí en adelante los futuros mecanismos sólo buscarían la perfección de la maquinaria, utilización de nuevos materiales y la disminución de los tiempos productivos, teniendo como consecuencia que la Industria papelera este en constante desarrollo y que durante el siglo XX haya alcanzado elevados niveles de producción. Estados Unidos y Canadá son los mayores productores mundiales de papel, pulpa y productos papeleros.

En 1874, el químico Sueco C.D. Ekman trató la madera con bisulfito de magnesio y construyó la primera fábrica de pulpa al sulfito. En esta instalación se utilizaron pequeños digestores rotatorios calentados indirectamente. En Alemania el químico A. Mitscherlich estaba desarrollando un proceso utilizando un digestor cilíndrico, horizontal, estacionario con calentamiento suministrado directamente por medio de vapor en serpentines hechos de plomo o cobre; el cocimiento se lleva a cabo a temperaturas y presiones bajas y por periodos de tiempo más prolongados que anteriormente. La adición directa de vapor dentro del digestor, aparentemente fue practicada por vez primera en 1878 por los austriacos Eugen Ritter y Carl Kellner, con el propósito de lograr las ventajas de menor tiempo requerido para calentar el digestor y como consecuencia un menor tiempo de cocción. El proceso Ritter-Kellner fue establecido en Canadá en 1885 por Governor Russel y Charles Riordon, quienes construyeron la primera planta en Ontario. El proceso al sulfito fue introducido a los Estados Unidos en 1882 por Charles S. Wheelwright, quién trabajo con digestores cilíndricos rotatorios revestidos de plomo.

Después de estos inicios, la tecnología de obtención de pulpa al sulfito practicada por Estados Unidos y Canadá, se estabilizó por un número considerable de años tiempo durante el cual la base usada fue el calcio junto con el ácido sulfuroso. El proceso clásico al sulfito ácido de calcio adolece de dos principales defectos y éstos son que, por regla general, sólo se usa con éxito para procesar especies de madera que contienen resinas en pequeñas cantidades y que los procesos de recuperación de calor tienen comparativamente mayores desventajas debido a los problemas de incrustaciones en la evaporación, ya que no existe proceso de recuperación de productos químicos, de no ser

como cenizas, que tienen el inconveniente de ser muy finas y con problemas de eliminación.

Por éstas y quizá por otras razones adicionales, las últimas décadas han observado cambios fundamentales en los productos químicos del proceso y en los métodos utilizados para la producción de pulpa al sulfito. Casi todas las fábricas nuevas de pulpa al sulfito ácido tienen sistemas con base de magnesio (sustituyendo el carbonato de calcio por óxido de magnesio), con procesos completos de recuperación de calor y productos químicos.

La fabricación del papel es una de las industrias más antiguas y más grandes del mundo. Es difícil comparar, en tamaño esta industria con otras, debido a los múltiples usos tanto de la pulpa como del papel y a la acumulación de valores de los muchos productos hechos con estos materiales básicos. El consumo de papel es uno de los más fiables indicadores del grado de desarrollo del país, más higiene, más sanidad, más comunicación, más comercio, más educación, más cultura, supone más papel, los países desarrollados son también los que tienen mayor consumo de papel, sea cierta o no esta afirmación, el caso es que esta industria tiene un potencial casi ilimitado para su futuro desarrollo. A lo largo de la historia, el papel ha representado un auténtico vehículo de progreso, la constante evolución del papel está estrechamente vinculada a los grandes logros técnicos de la civilización, desde la imprenta hasta nuestros días, en sus casi dos mil años de historia, el papel no solo ha demostrado su compatibilidad con los sucesivos avances técnicos, sino que han permanecido ligados al desarrollo de nuevos productos papeleros.

El papel en la vida diaria, resulta imprescindible para dar respuesta a un sinfín de necesidades en la sociedad del siglo XXI, y el crecimiento sostenido del consumo de papel confirma su utilidad como material versátil y de gran eficiencia económica y medioambiental.

## 1.2 Procesos para la fabricación del papel.

---

Las fábricas papeleras convierten las fibras de celulosa en papel, que se transforma después en una enorme variedad de productos con numerosas aplicaciones, el papel tiene la capacidad de almacenar el carbono, evitando que se libere en la atmósfera, una tonelada de papel almacena 1.4 toneladas de dióxido de carbono, cantidad similar a la que se emite al quemar 600 litros de gasolina.

La celulosa es la materia prima de las industrias del papel. Es un material natural, abundante, económico, es el nombre genérico para definir un amplio rango de productos compuestos por fibras naturales que son susceptibles de desarrollar enlaces químicos entre ellas, durante el proceso de fabricación del papel. Contenido principalmente en árboles y otras plantas. Los árboles son la principal fuente de fibras naturales para más del 90% de la producción de celulosa a nivel mundial, el restante 10% de las fibras son aportadas por otras plantas tales como pastos, bambúes, bagazos, algodones linos, cáñamos y otros. Un material fibroso debe reunir ciertas condiciones tecnológicas, impuestas por el mercado y la industria, con porcentaje elevado de celulosa, relativamente barato, fácil de recolectar, transportar y manejar.

El proceso de fabricación de papel se inicia con la producción de la celulosa, para ello partimos de la madera donde se tiene que separar las fibras unidas entre sí por la lignina lo que se consigue por procedimientos mecánicos, químicos o semiquímicos. La celulosa así obtenida puede emplearse directamente en la fabricación de papel o someterse previamente a un procesos de blanqueo, con lo que se elimina la lignina residual que oscurece la pasta. Dependiendo del proceso de producción, las celulosas se clasifican en los siguientes tipos:

- a. Celulosa Química.
- b. Celulosa Mecánica.
- c. Celulosa Semiquímica.

#### **a. Celulosa Química.**

Se obtiene a partir de un proceso de cocción química de la madera a altas temperaturas y presiones, cuyo objetivo es disolver la lignina contenida en la madera con una solución alcalina, liberando las fibras. Dependiendo de los aditivos químicos usados en la cocción existen celulosas químicas Kraft y al sulfito, siendo la primera la más utilizada a nivel mundial, motivo por el cual se eligió este proceso para realizar el presente trabajo. La celulosa química se caracteriza por tener un rendimiento total relativamente bajo es decir sólo entre un 40% y 60% del material original (madera) queda retenido en el producto final (fibras) el resto (lignina) se disuelve en la solución alcalina para ser posteriormente quemada y generar con ello la energía térmica y eléctrica necesaria en los procesos productivos. Este proceso requiere un alto consumo de energía eléctrica. Estas celulosas son más resistentes ya que las fibras quedan intactas, son más fáciles de blanquear y menos propensas a perder sus cualidades con el tiempo.

#### **b. Celulosa Mecánica.**

Se obtiene a partir de un proceso en el cual la madera es molida y triturada mecánicamente, siendo sometida a altas temperaturas y presiones. Posteriormente la pasta es clasificada lavada y eventualmente blanqueada. Este proceso requiere un alto consumo de energía eléctrica. Esta celulosa se caracteriza por tener un alto rendimiento, normalmente entre un 85% y un 95%, pero la lignina remanente en el producto es susceptible a oxidarse, generando el color amarillo que caracteriza a los periódicos viejos, Los principales usos de esta celulosa son la fabricación de papel para periódicos y papeles para impresión y escritura de menor calidad. Esta celulosa es menos resistente que la química, no por la presencia de lignina remanente, sino porque las fibras que están contenidas en ella han sido cortadas en el proceso de fabricación. A nivel mundial de un total de 175 millones de toneladas de celulosas producidas, cerca de un 76% corresponden a celulosa química y sólo un 24% a celulosa mecánica. Otra forma de clasificar la celulosa esta en función del tipo de materia prima usada para su fabricación, dependiendo de ella existen:

##### **b.1 Celulosa de fibra larga (softwood pulp).**

##### **b.2 Celulosa de fibra corta (hardwood pulp).**

La diferencia principal entre estas dos celulosas es su resistencia, la cual depende básicamente de las uniones moleculares que se establecen entre las fibras, la celulosa de fibra larga genera en los papeles una red de uniones más resistentes que las de fibra corta la longitud de las fibras largas fluctúa entre 2.5 y 4.5mm contra los 0.7 a 1.8mm de las fibras cortas. Dentro de la celulosa de fibra larga, destacan:

**b.1.1. Celulosa NBSKP** (Noerthen Bleached Softwood kraft Pulp) producidas principalmente en Canadá y los países escandinavos en base a pinos de bosques naturales y de crecimiento lento. Su principal característica es la resistencia, debido a la longitud de las fibras que la constituyen. En el mercado es valorada con un mayor precio.

**b.1.2. Celulosa BSKP** (southern Pine), producida en el sur de Estados Unidos y norte de Argentina usando pinos de crecimiento rápido, cuya calidad y resistencia es inferior a la NBSKP.

**b.1.3. Celulosa BSKP** (Radiata Pine), producida básicamente en Chile y Nueva Zelanda, en el mercado es calificada como un producto intermedio entre las dos celulosas anteriores. La materia prima está basada en plantaciones de pino radiata de crecimiento rápido.

Dentro de la celulosa blanca de fibra corta, destacan:

**b.2.1. Celulosa BEKP** (Bleached Eucalyptus Kraft Pulp), se produce en base a plantaciones de crecimiento rápido de eucaliptos, los principales productores son Brasil, Chile, Península Ibérica, Australia y Nueva Zelanda.

**b.2.2. Celulosa Birch**. Se produce con abedules del norte de Europa, los principales productores son Finlandia y Suecia.

**b.2.3. Celulosa NMHW** (Northern Mix Hardwood), se produce con una mezcla de varias especies de madera hardwood, principalmente en Canadá, Francia, Japón, Corea y este de Europa.

**b.2.4. Celulosa MTH (Mix Tropical Hardwood)**, se produce a partir de una mezcla de varias especies tropicales de madera hardwood de Indonesia.

**b.2.5 Celulosa SMHW (Southern Mix Hardwood)**, se produce con una mezcla de varias especies de madera hardwood en el sur de Estados Unidos y en el mercado es valorada con un precio mayor.

### **c. Celulosa Semiquímica.**

La obtención de ésta se inició comercialmente a través del desarrollo de un proceso para utilizar como subproducto ciertas astillas de madera duras, casualmente, el proceso ya estaba logrado en la época en que tres eventos coincidieron en la industria, (1) el convencimiento de que la demanda de materias primas fibrosas por parte de la creciente industria papelera, necesitaba de las maderas duras, que estaban disponibles en grandes cantidades y representaban un problema forestal por su no utilización; (2) el reconocimiento del comienzo de un aumento en los costos de la madera, que pudieron satisfacerse parcialmente por medio de un aprovechamiento más eficiente y (3) la tremenda expansión de la industria del cartoncillo incluyendo la del cartón corrugado, como resultado de la explosión del mercado de la industria para empaques. La primera fábrica semiquímica fue establecida en 1925 por la Southern Extract Co., en Texas para utilizar astillas de castaño como subproducto de la extracción de taninos. Se utilizó el proceso semiquímico al sulfito neutro (NSSC) y la pulpa obtenida se utilizó en cartón corrugado.

En virtud del gran número de tipos de papel que se producen, sería muy extenso referirse a cada uno de ellos, sin embargo, a manera muy general se puede decir que la manufactura del papel comprende operaciones esencialmente mecánicas, las cuales se basan en la tendencia de las fibras celulósicas en suspensión acuosa a unirse entre sí cuando se secan.

El proceso de la elaboración se lleva a cabo en dos grandes áreas, la primera se refiere a la preparación de las pastas, mientras que la segunda a la formación del papel, como se puede observar en la figura No.1.1.

## Preparación de Pastas.

Esta etapa cubre operaciones tales como la recopilación y almacenamiento de materias primas, el repulpeo, limpieza y refinación del material celulósico antes de su entrega a la máquina formadora de papel.

### **a. Materias Primas.**

Estas consisten de pulpas vírgenes de celulosa, fibras secundarias, encolantes y cargas. Las fibras vírgenes provienen del pulpeo de madera o de plantas anuales y dependiendo tanto del grado de integración productiva (astillas, celulosa, papel y su manufactura) como del tipo de papel a manufacturar, éstas se reciben ya sea como suspensión o como pliegos, los cuales pueden estar sin blanquear o blanqueados. Los pliegos de pulpas deberán registrar por lo general un contenido de humedad cercano al 10%, debido a esto, previamente se hidratan mediante el repulpeo. Por otra parte las fibras secundarias o recobradas son las que se obtendrán del reprocesamiento del cartón y papel de desperdicio.

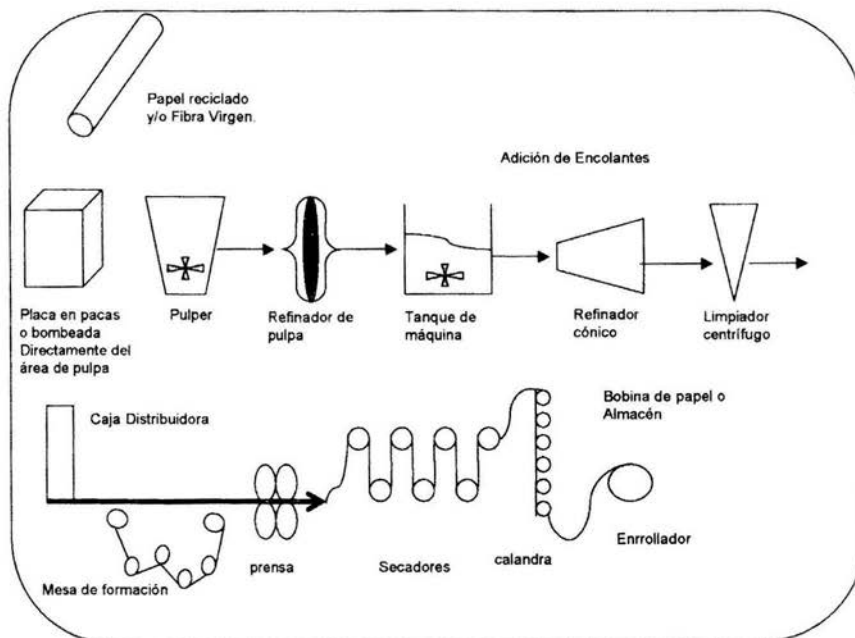


Figura 1.1 Proceso de elaboración de la celulosa y papel.

La adición de los encolantes tiene por objetivo otorgar al papel propiedades permeables, aumentar su resistencia a la tensión, al doblar, a la explosión y, junto con las cargas, propiciar una superficie que sea adecuada a la escritura e impresión. Entre los encolantes más usuales se encuentran las breas, los almidones modificados, la carboximetilcelulosa y recientemente las resinas sintéticas de urea-formaldehído o de melaminaformaldehído.

Por lo que respecta a las cargas, éstas son materias de relleno cuya función es la de ocluir (sellar) los huecos que de manera natural se originan al momento de unirse las fibras de la celulosa en la sección de formación de la máquina de papel. Dentro de las cargas más usualmente empleadas están los silicatos (caolín, talco y asbestinas), carbonato de calcio y magnesio, el dióxido de titanio, las tierras diatomáceas y entre los más apreciados, el sulfuro de zinc y el litopón.

#### **b. Repulpeo.**

Cabe citar que esta operación es imprescindible en papeleras cuya principal fuente de fibra es el papel recuperado o bien en aquellas no integradas a las plantas de pulpa. En el repulpeo se convierte en suspensión fibrosa o pasta todo aquel material celulósico que se recibe en forma seca adicionando la cantidad adecuada de agua en el hidrapulper o molino. El hidrapulper es un recipiente metálico de forma cilíndrica vertical en cuyo fondo se encuentra un rotor, acoplado por lo general a un motor eléctrico. El continuo accionar del rotor origina que los diferentes materiales en estado sólido se abran y dejen libres a las fibras de celulosa. La descarga de la pasta se realiza a través de una placa perforada, ubicada en el fondo del hidrapulper que a la vez actúa como criba al evitar el paso de partículas extrañas al proceso tales como: grapas, alambres, etc. Durante la operación de repulpeo se efectúa la adición de polvos minerales (cargas) así como un encolado interno de las fibras, el encolado puede ser breas de colofonia, saponificadas y alumbre (sulfato doble de potasio y aluminio hidratado como dispersante de dicha brea).

#### **c. Limpieza o depuración.**

Cuando se drena los hidrapulpers se efectúa una retención de partículas indeseables pero no es suficiente y por lo tanto puede permitir que alguna de ellas llegue a dañar a los refinadores o bien a la máquina de papel aunado a lo anterior está el hecho de que cierto tipo de papeles requieren cumplir con estándares de limpieza muy elevados para su comercialización. Luego entonces un área de preparación de pastas debe contar con los



dispositivos necesarios que permitan seguir procesando la suspensión obtenida en el repulpeo de forma continua.

#### **d. Refinación.**

Las fibras de celulosa tal y como sale en la etapa de depuración, son inapropiadas para la manufactura de papel, por lo que deben de someterse a un tratamiento de modificación superficial, esta se realiza al pasar a través de equipos denominados batidores o refinadores. Durante la refinación, las fibras se encuentran hinchadas por la absorción de humedad, lo que las hace flexibles y manejables. En general se argumenta que con la refinación, la capacidad de adhesión entre fibras se incrementa, debido a la modificación original en su superficie. Anteriormente, esta etapa se efectuaba en una "pila holandesa", hoy en día se realiza en refinadores continuos (cónicos) o del tipo doble disco. Los últimos presentan más ventajas operacionales que los del tipo cónico.

#### **e. Formación del papel.**

La máquina para elaborar el papel en forma continua, convierte una suspensión fibrosa muy diluida en una hoja seca de papel a velocidad relativamente elevada. La máquina Fourdrinier o de mesa plana consiste básicamente de una mala sin fin, la cual se desplaza a velocidades que oscilan desde una decena de metros por minuto hasta cerca de 1500 metros por minuto. En uno de los extremos de esta malla se deposita, en régimen laminar, la suspensión fibrosa, que previamente se ha vuelto a refinar, depurar y diluir. Conforme avanza la suspensión a través de la máquina, va perdiendo humedad, originándose simultáneamente el entrelazamiento de las fibras para conformar la hoja de papel. La operación de desaguado se efectúa cuando la malla pasa sobre cajas de succión y rodillos de mesa, en el extremo opuesto de la malla se obtiene una hoja de papel todavía muy húmeda, por lo que a través de un fieltro de lana se conduce a varios juegos de prensas, en donde pierde más humedad en forma mecánica, dependiendo del diseño de las prensas, la hoja se entrega a los secadores de la máquina.

#### **1.2.1. Clasificación del Papel.**

Con las tecnologías de la información, más que un nuevo soporte ha llegado una nueva forma de distribución de la información, que está provocando un nuevo desarrollo de la comunicación y el comercio y por consecuencia un incremento del consumo de papel. Es

bien conocida la versatilidad del papel, desde las cajas de cartón ondulado o cartoncillo, sacos de papel, folios, libros, periódicos y revistas, hasta los papeles higiénicos y sanitarios, el papel es un producto presente en nuestra vida. Existen 36 variedades de celulosa y cerca de 500 variedades de papeles que sirven a más de 300 usos finales; vasos, platos, servilletas, manteles, pañuelos, moneda, flores, tarjetas, carpetas, filtro, etc., todo esto y mucho más se fabrica en papel. Sería difícil imaginar un mundo sin papel cuando en la vida diaria interactuamos docenas y docenas de veces con el papel en sus distintas variedades.

Por otra parte cuando se manejan gramajes bajos de papel, como por ejemplo, higiénicos y faciales se aplica un solo tambor rotatorio cuya dimensión es extraordinariamente superior a los utilizados para la deshidratación de papeles de escritura, impresión y empaque. Con el propósito de incrementar la capacidad de evaporación de la sección de secado, es común utilizar una serie de quemadores a gas. A continuación se describirán algunos tipos de papel más utilizados en el mercado:

**Papel Prensa:** Utilizado para la impresión de diarios, esta fabricado en su mayoría a base de papel recuperado o pasta mecánica. Puede ser blanco o ligeramente coloreado.

**Papel higiénico y sanitario:** Fabricados a base de fibra virgen o papel recuperado o bien una mezcla de ambos, se utilizan en la higiene personal (papel higiénico, compresas, pañales, pañuelos, etc.) en el ámbito doméstico (rollos de papel de cocina, servilletas, manteles, filtros de café, etc.) y como material sanitario y de limpieza industrial.

**Cartón de hoja:** Es un grado de cartón producido en la máquina de cilindro que contiene el mismo material en todos sus pliegues, procedente siempre del papel de desperdicio. Este cartón se produce en un amplio margen de espesores y grado plegables y no plegables.

**Bristol de fábrica y bristol falso:** El papel bristol de fábrica denominado así para diferenciarlo del bristol de índice hecho con máquina fourdrinier, se utilizan sobre todo para cartulinas de anuncios. En general, los papeles bristol falsos se hacen con cierto número de grados distintos de materiales, tales como desperdicios mezclados, papel de

periódico, periódicos sin imprimir, desperdicios Kraft o pulpas vírgenes. Se utilizan para producir tarjetas baratas, boletos y boletos de color.

**Cartones para cajas plegables:** Cuando son necesarias las cualidades de plegado, como ocurre en los cartones para cajas plegables, las dos capas exteriores del cartón deberán hacerse con material de fibras largas, tales como las pulpas al sulfito y al sulfato, blanqueadas. El material debe de estar ligeramente refinado, para que desarrolle la resistencia necesaria al plegado y reduzca la cantidad de rizo en la hoja. El material de relleno, que habitualmente se obtiene de materiales de desperdicio mezclados, se refina intensamente, para eliminar los grumos de material no desfibrado o los mazos de fibras, los que han pasado por los sistemas de limpieza y cernido. Los grados principales son el manila blanqueado, el revestido con blanco y el recubierto con arcilla, este tipo de papel se usa para envases para cereales, jabón en polvo, cigarrillos, vestidos y productos similares. Las propiedades de impresión tienen una gran importancia, y como la mayoría de los cartones se utilizan para empaquetar, las propiedades adhesivas son también muy importantes.

**Cartón combinación manila:** Este grado sirve para designar a un cartón en el que una o las dos capas exteriores son de una materia prima y/o color diferente a la intermedia, en tanto que un cartón normal o sólido tiene en todo su grueso el mismo material. El relleno puede estar aproximadamente 40% de pulpa al sulfito sin blanquear y 60% de pulpa mecánica. Puede utilizarse el revestimiento con arcilla, en general, estos cartones se utilizan para la impresión muy blanca.

**Cartón para contenedores:** Este cartón se hace con un relleno de papel de desperdicio mezclado y el recubrimiento con fibra Kraft, la que puede ser fibra virgen kraft o una mezcla de virgen kraft y kraft de desperdicio, si se utiliza éste último, a veces a este cartón se le conoce como cartón con recubrimiento de yute. El cartón con recubrimiento de yute puede recibir un acabado en seco o bien al agua y en algunos casos el cartón se encola en la calandria utilizando almidón, carboximetil celulosa y otros productos. El cartón relleno con recubrimiento kraft es semejante al cartón recubierto de yute, excepto que se utiliza material kraft virgen en el recubrimiento.

**Cartón preparado:** Este cartón se diferencia del cartón para cajas plegables en el sentido de que se requieren buenas cualidades de plegado, se hace con materiales de fibra corta, tales como de madera molida, periódico, paja o papeles mezclados. En algunos casos el recubrimiento se hace con material blanco o blanqueado, con el fin de mejorar la apariencia. Este cartón se utiliza para hacer cajas rígidas y para hacer cartón sólido o combinación, según sea el tipo de la caja; su grueso varía desde 0.405 a 1.650 mm, la rigidez, la tiesura y la resistencia al maltrato son cualidades esenciales.

#### Papel para envases y embalajes.

**Papeles para cartón ondulado:** Utilizados en las distintas capas de las cajas de cartón ondulado, se fabrican básicamente con papel recuperado, si bien pueden incorporar, en distinta proporción, pasta virgen.

**Papel kraft sacos:** Papel de gran resistencia empleado en la fabricación de sacos de gran tamaño para materiales de construcción, alimentación animal, etc.

**Cartoncillo:** Empleado en la fabricación de estuches plegables o envases, es un material compacto hecho a base de pasta virgen y/o papel recuperado, con varias capas y normalmente acabado con recubrimiento de una capa de estuco.

**Papeles especiales:** La industria papelera fabrica una amplia gama de productos de alta tecnología: papel impermeabilizado para embalaje de productos hortofrutícolas; papel micronizado de gran extensibilidad, papel inter-leaving de excelente comportamiento a elevadas temperaturas para intercalar en usos industriales como el laminado en frío de acero, papel cushion para usos industriales como sustituto de poliuretano, papel moneda, papel metalizado directamente por alto vacío, papel autoadhesivo inhibidor de moho, papel acetato de celulosa transparente, etc.

**Otros grados de cartón:** Entre los demás grados de cartón de cilindro están el cartón de lavandería, el cartón de calendarios (habitualmente cartón recubierto con blanco o arcilla), para dulces (usualmente cartón con recubrimiento de yute) cartón para tapas de botellas (por lo general recubierto con papel al sulfito) y cartón para cajas de cerillos (puede ser un cartón blanqueado con recubrimiento de manila o un cartón con recubrimiento blanco).

**Papel dúplex:** Es un grado especial de papel de dos capas que se hacen con una máquina de dos cilindros o con un cilindro de combinación, el producto se utiliza para bolsas de papel, por ejemplo los sacos de dúplex para harina, que tienen una capa blanca en el exterior y una capa azul oscura en el interior. La capa azul se hace con 100% papel de fibra textil y la parte exterior tiene parte de fibra textil y parte de pulpa al sulfito. Puede colocarse kraft virgen en lugar de la fibra textil se dispone de un refinado adecuado.

### **1.2.2. Ciclo sostenible del papel.**

La progresiva degradación del medio ambiente y su impacto sobre la disponibilidad de los recursos han hecho del desarrollo sustentable una demanda de primer orden en la sociedad contemporánea. Frente a ella, la reforma microeconómica presupone la incorporación de la gestión ambiental integral como una prioridad para las empresas.

Las fábricas de celulosa utilizan madera de especies de crecimiento rápido, procedentes de cultivos forestales gestionados sosteniblemente, una hectárea de cultivo de estas especies fija al año 10 toneladas de CO<sub>2</sub>, cuatro veces más que los árboles de crecimiento lento. Las fábricas papeleras convierten las fibras de celulosa en papel, que se transforma después en una enorme variedad de productos. Una tonelada de papel almacena 1.4 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes a la que se emite al quemar 600 litros de gasolina. Con el desarrollo y aplicación de tecnologías cada vez más respetuosas con el medio ambiente, el sector pastero-papelerero ha conseguido grandes ahorros de agua y energía y una importante reducción de las emisiones.

La recuperación y reciclaje del papel usado prolonga la vida útil de las fibras de celulosa, evitando que acaben en los basureros, y de este modo reducen su volumen y emisiones de gas metano. El papel que no entra en el circuito de reciclaje (por estar contaminado y no ser apto como materia prima) puede ser empleado como combustible, al igual que la biomasa residual del proceso de fabricación. Así se cierra y equilibra el ciclo sostenible del papel, que parte de una fuente renovable y natural de materia prima.

La industria papelerera, que a partir de una materia prima renovable como la madera fabrica productos reciclables con procesos de producción cada vez más respetuosos con el medio ambiente, es sin duda alguna, uno de los sectores mejor posicionados para cumplir con los requerimientos del desarrollo sostenible, consecuentemente, la industria papelerera

está convencida de que su futuro pasa por la adaptación a los más estrictos estándares medioambientales. La recuperación de papel y cartón usado vuelve a las fábricas papeleras como materia prima para fabricar papel nuevo, este puede recuperarse a través de diversas formas:

- Recolección industrial en empresas, editoriales, imprentas y grandes superficies comerciales.
- Recolección selectiva a través de los contenedores de colores, o bien en los pequeños comercios.
- Recolección especiales en oficinas, edificios de organismos, instituciones públicas (papel limpio).

Después de ser limpiado y clasificado en diferentes calidades, el papel recuperado es empleado como materia prima por la industria papeleras para fabricar papel nuevo, de este modo se evita que el papel acabe en el basurero, aprovechando mejor los recursos y reduciendo las emisiones de gas metano y CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, la degradación de las fibras impone límites a la fracción de papeles que se puede producir con fibras recicladas, por lo que constantemente se deben agregar fibras vírgenes para su producción.

En el último tiempo ha cobrado mayor importancia a nivel mundial el uso adecuado de los recursos naturales. En la industria de los papeles y cartones, el reciclaje es cada vez más relevante, de acuerdo a la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), se reciclaron a nivel mundial, 48 millones de toneladas anuales en 1980, y 134 millones de toneladas en 1998, es decir desde un 23% a un 45% en el porcentaje de recuperación respecto al consumo. La FAO predice que en el 2010 el consumo de papel reciclado alcanzará los 197 millones de toneladas, con una tasa de recuperación del 50%.

Asimismo, México como país consumidor de fibra secundaria, se encuentra entre los diez primeros países recolectores del mundo, con un índice de recolección de 46.7%, y entre los tres primeros países recicladores del mundo, con un índice de utilización de fibra secundaria de 78.6%, lo que indica claramente de que existe una infraestructura y

mecanismos de recolección de fibras secundarias. En la siguiente figura No. 1.2 se muestra la descripción de la pirámide de reciclaje de papel.

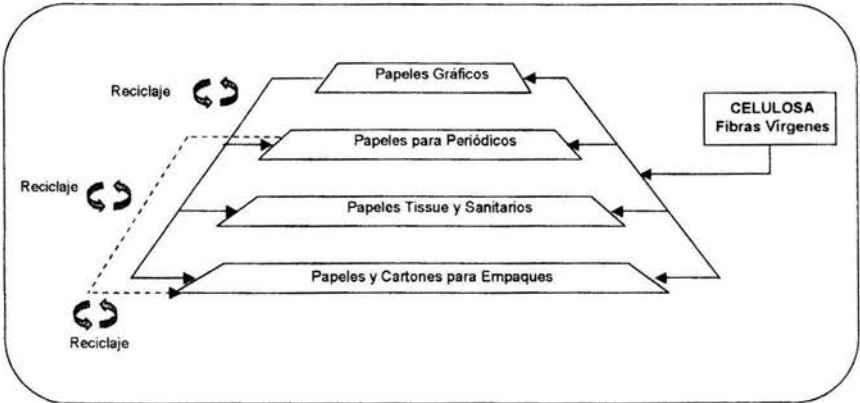


Fig. 1.2 Pirámide del reciclaje de papel.

### 1.3 Contaminación del agua en la industria papelera.

---

Los conflictos por el agua están adquiriendo características críticas, la demanda en la ciudad de México esta dejando sin el líquido a muchas regiones más allá de los límites geográficos de la cuenca y la sobreexplotación del acuífero ha provocado graves hundimientos en algunas partes de la ciudad. Otros problemas resultan de los desechos que se vierten al sistema de drenaje o que son arrastrados por lluvias y que llegan a las zonas periféricas (sobre todo las agrícolas) sin tratamiento. Más de 40 m<sup>3</sup> de aguas usadas salen de la ciudad por segundo, siguen su curso de antiguos ríos y pasan por sitios donde se utilizan para regar cultivos, exponiendo a la población de cualquier especie. A comienzos del siglo XX, algunas ciudades e industrias empezaron a reconocer que el vertido directo de desechos en los ríos provocaba problemas de salud. Esto llevó a la construcción de instalaciones de depuración. Aproximadamente en aquellos mismos años se introdujo la fosa séptica como mecanismo para el tratamiento de las aguas residuales domésticas tanto en las áreas suburbanas como en las rurales. Desde la década de 1970, se ha generalizado en el mundo industrializado la cloración, un paso más significativo del tratamiento químico.

El agua que se ha obtenido de forma barata y abundantemente en el pasado ahora se ha convertido en un recurso limitado y valioso, en el que hay que realizar fuertes inversiones para su mantenimiento y saneamiento, replanteándose así el compromiso de hacer un uso eficiente del agua, su conservación y reuso en aquellos casos donde no se requiere con calidad potable. Todos necesitamos y vivimos gracias al agua, líquido vital cuya disponibilidad escasea por el consumo indiscriminado, mala distribución, desperdicio y por la contaminación excesiva a la que esta expuesta, aún sabiendo que el total del agua en todo el planeta es de 1390 millones de Km<sup>3</sup>, de los cuales sólo el 0.26% es directamente utilizable por la especie humana (para la agricultura, industria y usos domésticos).<sup>(1)</sup>

El agua funciona como un portador y recolector de sustancias de aire, tierra y corrientes de agua, transportándolas sin cesar en el curso de su ciclo natural. Los materiales disueltos en el agua se absorben por microorganismos que habitan ríos, lagos y mares, purificándola. El agua que penetra en la tierra libera oxígeno disuelto en donde el aire

---

<sup>(1)</sup> UNAM, ¿Cómo Ves? Año 5 No. 54, Pág. 10-12, México., D.F. 2003.



apenas puede llegar, y al mismo tiempo es purificada por la cama del filtro natural volviéndose agua subterránea limpia. Tales procesos son llamados purificación natural, este tipo de aguas se utilizan para procesos industriales o domésticos.

Para la industria el agua es un recurso indispensable para una gran variedad de procesos de producción en donde sufre tanto transformaciones físicas como de calidad. El agua después de ser usada se descarga como un agua residual que contiene gran variedad de contaminantes naturales y artificiales. Se calcula que más del 90% de residuos generados por la industria se vierten en las aguas, es por ello que el agua que los contiene (contaminantes), deberá tratarse para devolverla a la naturaleza. Este es el objetivo principal para el tratamiento de aguas residuales y así mantener la vida sana de los seres humanos.

El objetivo de los esfuerzos para controlar la contaminación es dejar inalterables el ambiente natural. La contaminación podría definirse como la introducción de una masa de agua de sustancias de tal característica y en tal cantidad que la calidad natural del agua resulta tan alterada que se afecta su utilidad o se le hace perjudicial para la vista, el gusto o el olfato.<sup>(2)</sup> Se puede considerar que cualquier alteración en la calidad del agua natural es inherentemente mala, pero este punto de vista es insostenible cuando se comprueba que incluso en los sistemas en los que el hombre no influye, la calidad del agua cambia con el tiempo, como cuando un lago o río experimenta una eutrofización natural. El Hombre se limita a ser un factor adicional en el sistema dinámico de los cambios.

Si se define un contaminante como una sustancia que puede alterar el ambiente natural, resulta que todos los materiales conocidos son contaminantes potenciales, por lo que se necesitó una clasificación más estricta establecida por La United Status Environmental Protection Agency en la cual los contaminantes se dividieron en ocho grupos:

- a. Sustancias que consumen oxígeno.
- b. Agentes que causan enfermedad.
- c. Compuestos sintéticos inorgánicos.
- d. Nutrientes de las plantas.
- e. Sustancias inorgánicas químicas minerales.

---

<sup>(2)</sup> James P. Casey "Pulpa y Papel" Vol. II, Ed. Limusa, México, D.F., 1991.

- f. Sedimentos.
- g. Sustancias radiactivas.
- h. Descargar térmicas.

**a. Sustancias que consumen oxígeno.**

El grupo más amplio que consume oxígeno son de carácter orgánico, y se han efectuado pruebas que usualmente reflejan el contenido orgánico del desperdicio. La mayoría de las pruebas no miden la cantidad de materia orgánica en forma directa, sino que relacionan esta con la cantidad de oxígeno que se requeriría para oxidar la materia orgánica. Si la composición exacta de la materia orgánica se conoce de manera que pueda expresarse en una fórmula, la demanda teórica de oxígeno se determinara escribiendo una reacción en la que la materia orgánica se oxida para formar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). Los métodos de laboratorio usuales son los de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), el carbono orgánico total (COT) y la demanda total de oxígeno (DTO).

**b. Agentes que causan enfermedad.**

La preocupación principal en esta categoría corresponde a microorganismos patógenos, bacterias, hongos, virus y parásitos, que ocasionan enfermedades en el hombre. Si la fábrica de producción de papel tiene un sistema segregado de alcantarillas, en el que se maneja independientemente el desperdicio sanitario, no existe razón para que se encuentren organismos patógenos en el líquido de salida de la fábrica. Debido a que el número de organismos patógenos presentes en los desperdicios y en las aguas contaminadas son pocos y difíciles de aislar, el organismo coliforme, más numeroso y más fácil de comprobar, se utiliza como indicador. La presencia de organismos coliformes se toma como indicación de que pueden encontrarse también otros organismos patógenos y a la ausencia de organismos coliformes se acepta como indicación de que el agua está libre de organismos que produzcan enfermedad. El empleo de los coliformes como organismos indicadores se complica debido a que el *Aerobacter* y ciertas variedades de la *Escherichia coli* (*E. coli*) no son totalmente de origen fecal, como consecuencia de esto se ha creado una prueba con elevada temperatura de incubación (44.5°C), con el propósito de diferenciar este grupo. En particular se sabe que la *Klebsiella pneumoniae* ha respondido positivamente a la prueba y se encuentra presentes

en los flujos de salida de la fabrica de papel. Por ello una "prueba coliforme fecal" positiva no siempre indica la contaminación con materia fecal.

### **c. Compuestos orgánicos sintéticos.**

Esta categoría de contaminantes tiene a su vez cuatro subclasificaciones las cuales se describirán a continuación:

c.1 Detergentes.

c.2 Plaguicidas.

c.3 Aceites y Grasas.

c.4 Productos Químicos Industriales.

#### c.1 Detergentes.

Los detergentes son materiales potencialmente tóxicos, y además pueden crear problemas por la producción de espumas. Los detergentes se utilizan en las fábricas de papel para ciertas aplicaciones de limpieza, tales como el lavado de los fieltros. También se utiliza una amplia variedad de materiales de actividad superficial como agentes dispersantes para mantener libre el sistema de depósitos y para limpiarlo.

#### c.2 Plaguicidas.

En la industria del papel se utilizan los microbicidas para mantener la población microbial en el sistema de agua dentro de ciertos límites, al fin de evitar el incremento de lodos. Entre los microbicidas utilizados aparecen el cloro, los fenoles clorados, las aminas, los compuestos cuaternarios de amonio, los compuestos de organoazufre y los compuestos de plata. El criterio aplicado a la utilización de un microbicida es el de la susceptibilidad que tiene frente al tratamiento biológico y su persistencia en el ambiente.

#### c.3 Aceites y Grasas.

Las descargas de aceites y grasas, además de su toxicidad potencial, ocasionan dificultades, reducen el aireado del flujo y la penetración de la luz y representan un riesgo potencial de incendios. Los problemas se deben a la descarga de aceites lubricantes ya

gastados o por posibles derrames generalmente cuando se utiliza petróleo como combustible para las calderas.

#### c.4 Productos Químicos.

Los productos químicos que se generan en los procesos de producción del papel y blanqueado o que se extraen de la madera durante la producción de pulpa, pueden también ser causa de problemas. Algunos compuestos tóxicos no volátiles más importantes se producen en el descortezado, en la producción kraft de pulpa, en la producción de pulpa al sulfito, y en la producción mecánica y blanqueado. Los compuestos de azufre volátil reducido, tales como el sulfuro de hidrógeno, el mercaptano de metilo y el dimetilsulfuro, contribuyen también a la toxicidad en los flujos de salida de una fábrica kraft. Además de su toxicidad estos productos químicos pueden ocasionar dificultades al dar sabor y olor al agua de entrada. Los sulfuros, los compuestos orgánicos de azufre, los ácidos resinosos, los terpenos, procedentes de los efluentes de la fabrica con proceso kraft han sido identificados como causa de dificultades además de las sustancias fenólicas cloradas presentes en los desperdicios de la producción de pulpa.

Los cuerpos coloreados requieren también considerarse ya que el color puede ser "real" o "aparente". El color real del agua, es aquella en donde se ha eliminado la turbidez. El color aparente incluye no solamente el debido a las sustancias en solución, sino también el originado por la materia en suspensión. En el proceso de producción química de la pulpa, la lignina y sus derivados se solubilizan y eliminan de la madera. Los licores de cocción gastados que contienen dichos compuestos muy coloreados se eliminan de la pulpa en una secuencia de lavado después del proceso de cocción. Los efluentes coloreados pueden tener los siguientes efectos en detrimento de las aguas que los reciben:

1. El color retarda la transmisión de la luz del sol y puede interferir con la fotosíntesis, reduciendo así la productividad de la comunidad acuática.
2. El color natural del efluente se altera, perjudicando su valor recreativo.
3. El color afecta a los usuarios del agua, lo que da por resultado costos más elevados en su tratamiento, además de que puede presentar problemas operativos en los procesos.

4. Los cuerpos coloreados y que además contienen iones metálicos tales como el hierro o cobre interfieren en el metabolismo normal de algunos organismos bajos de la cadena alimenticia, reduciendo de esta manera la productividad del agua que la recibe.
5. El color derivado de la lignina indica la presencia de compuestos potencialmente inhibidores y pueden tener un efecto directo en algunos organismos inferiores de la cadena alimenticia.
6. Los cuerpos de color ejercen una DBO a largo plazo desde 20 a 100 días, que no es posible medir mediante la prueba de DBO<sub>5</sub>.

#### **d. Nutrientes de las plantas.**

La principal preocupación se refiere a la cantidad de nitrógeno, fósforo e iones de vestigios metálicos que se encuentran en el desperdicio. Los efluentes de la industria de la celulosa y del papel son tradicionalmente bajos en nitrógeno y fósforo, y deben suplementarse con los mismos antes de llevar a cabo el tratamiento biológico. Por lo tanto, debe de existir poca dificultad, a menos de que los nutrientes se suministren en exceso durante el proceso del tratamiento del agua. La única excepción puede ocurrir cuando se utiliza amoniaco en la producción de la pulpa mediante el proceso al sulfito con base de amonio.

#### **e. Productos químicos inorgánicos y sustancias minerales.**

En este punto existen tres clases de materiales que interesan, estas son:

- e.1 Ácidos.
- e.2 Álcalis.
- e.3 Metales Pesados.

El pH, la acidez y la alcalinidad del efluente de una fábrica de papel, dependen del tipo de producción de pulpa y de blanqueo que se utiliza, así como el tipo de papel que se fabrica. Pueden ir desde elevadamente ácidos, en el caso de la producción de pulpa al sulfito ácido, hasta elevadamente alcalinos, durante la producción de pulpa kraft. En todos los casos se requerirá ajustar el pH dentro de un margen de 6 a 8 antes del tratamiento biológico y/o la descarga. El margen de pH de 6 a 8 se acepta en general como el requerido para mantener la supervivencia de la mayoría de la vida acuática.

La principal dificultad en el caso de los metales pesados es su toxicidad, los principales iones de metales pesados que ocasionan preocupación en la industria del papel y de la pulpa son: aluminio (Al), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), titanio (Ti), hierro (Fe), mercurio (Hg), y zinc (Zn). Los metales pesados que podrían encontrarse en los efluentes de las fábricas de pulpa y papel proceden de tres fuentes principales:

1. Los productos químicos que se utilizan en la producción de la pulpa.
2. Los aditivos utilizados en la fabricación del papel.
3. Los productos de la corrosión del equipo,

Los productos químicos de la producción de pulpa, principalmente azufre, sal, piedra caliza, hidrosulfito de sodio, cloro y sus compuestos y la sosa cáustica, son generalmente bajos en metales pesados, y su empleo es tal que se precipitaran quizá durante el proceso y se descargarán con el producto o con el desperdicio sólido.

Se ha identificado el zinc en el efluente procedente de las operaciones del blanqueo de la pasta mecánica debido al empleo de hidrosulfito de zinc como producto químico para el blanqueo. La cantidad utilizada es lo suficientemente baja para que el zinc no alcance probablemente niveles tóxicos en los receptores de agua. El cambio a sales de sodio evita este tipo de contaminación.

En la producción de papel se utilizan algunos óxidos de metales pesados, tales como el dióxido de titanio como pigmentos, pero estos se encuentran en forma inerte y por lo tanto no existe mucha preocupación.

Aunque se produce alguna corrosión en el equipo de producción de pulpa y de papel, las pérdidas de estos metales como el níquel y el cromo son de tal magnitud que sería poco probable que aparecieran en el efluente. Los materiales de construcción que se utilizan en este tipo de industria tienen una alta resistencia a la corrosión, aún cuando podrían aparecer bajas concentraciones de hierro debido a la corrosión de los refinadores, batidores y otros equipos análogos. Es muy poco probable que los metales pesados de naturaleza tóxica lleguen a alcanzar niveles críticos en los efluentes de las fábricas de pulpa y papel. Lo confirma la ausencia de antecedentes históricos a cerca de las dificultades causadas por los metales pesados.

#### **f. Sedimentos.**

Esta clase de contaminantes se ocupa de los componentes sólidos sedimentables en los desperdicios, que pueden ocasionar la formación de sedimentos en las partes bajas de los ríos. Los lechos de sedimento perjudican los ríos debido a:

1. Cubren el fondo del río y alteran la vida béntica existente.
2. Requieren de los recursos de oxígeno del río.
3. Su descomposición anaeróbica produce problemas por los olores.
4. Los gases de la descomposición anaeróbica hacen flotar sólidos de lecho, llevándolos a la superficie del río.

Cuando los sólidos del desperdicio se consideran en un sentido más amplio que el de simples sólidos asentables, en general, se dividen en tres clasificaciones, y analíticamente tienen la siguiente definición.

- a) Sólidos Totales: Es toda materia que permanece como residuo después de una evaporación a temperatura de 103 a 105°C.
- b) Sólidos Disueltos: Es aquel material que pasa por el medio filtrante, y contiene tanto sólidos coloidales como disueltos.
- c) Sólidos en Suspensión (filtrables): Son aquellos aproximadamente mayores a 1 µm de diámetro y quedan detenidos en un medio filtrador.

Cada categoría de sólidos puede clasificarse todavía más con base en su volatilidad a 600°C. La fracción orgánica se oxidara y se expulsara como gas a esa temperatura, y la fracción inorgánica permanecerá bajo la forma de ceniza.

#### **g) Material Radioactivo.**

Este es un contaminante potencialmente muy peligroso, pero no es motivo de preocupación en la industria del papel ya que no aparece ningún material radioactivo en ninguna parte del proceso.

#### **h) Contaminación térmica.**

La adición del agua que contiene energía térmica a un río, hará que se eleve la temperatura del mismo, este aumento de temperatura ocasionará un aumento en la

velocidad metabólica de los organismos que viven en dicho río, lo que producirá una demanda mayor en cuanto a los recursos de oxígeno. El incremento de la temperatura hace que disminuya la solubilidad del oxígeno, esto puede dar lugar a un desplazamiento de la población en los tipos de organismos presentes. La EPA (Environmental Protection Agency) y las NOM's (Normas Oficiales Mexicanas) recomiendan una temperatura máxima promedio en el receptor de agua de 32°C, con una elevación máxima permisible por encima de la temperatura que naturalmente existe de 3°C. Los efluentes de las fábricas de papel están en general por encima de la temperatura ambiente, de manera que pueden ocasionar problemas potenciales de contaminación térmica, pero este problema sólo se manifestara cuando los flujos receptores sean pequeños, generalmente los estándares de la EPA podrán cumplirse mediante el empleo de un buen sistema difusor en la tubería de descarga.

Los principales parámetros de la contaminación que preocupan a la Industria del papel son la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el pH y los Sólidos Suspendidos Totales (SST), en algunas operaciones de producción el color será un contaminante de interés.

### **1.3.1 Usos del agua en la industria papelera.**

Un agua buena en cantidades abundantes es tan esencial para la fabricación de papel como lo es la celulosa. De hecho el agua es una de las materias primas más críticas utilizadas por las industrias de la pulpa y papel. Se usa directamente en los procesos de fabricación de pulpa, en el transporte, lavado y descortezado de las materias primas y aditivos, sirve para disolver o para mezclarse con los diversos ingredientes de encolado, carga y teñido y, además, es el vehículo que lleva a las fibras a través de los depuradores y refinadores hacia la máquina de papel, en donde desempeña una función de lo más importante en la elaboración de la hoja de papel, su uso es tan importante que va desde el pulpeo hasta la formación. El agua se utiliza también como fluido de intercambio de calor, para el sellado de los sistemas al vacío, como agente lubricante, para separar los subproductos y los desechos indeseables. También es empleada en la generación de fuerza y para proporcionar vapor, tanto de proceso como de producción de energía eléctrica, en la siguiente tabla No. 1.1 se mostraran algunas de sus aplicaciones.



El volumen de agua consumida depende de numerosos factores, entre los que cabe destacar tres principales:

1. El tipo de fibra utilizada como materia prima.
2. El producto fabricado y,
3. La tecnología del proceso de producción.

Algunas fábricas operan con consumos superiores a otras, debido a que utilizan máquinas antiguas o bien a la inexistencia de procesos de clarificación de aguas.

| Usos                           | Función             | Ejemplos  |
|--------------------------------|---------------------|---|
| Agua de procesos               | Transporte          | Transporte de fibras, aditivos, cargas, etc.  |
| Agua para rociadores y toberas | Dilución            | Ajuste de la consistencia, preparación de aditivos.   |
|                                | Mojado              | Mojado de papel de formación  |
|                                | Lubricante          | Rodillo de cabeza de retorno de papel, tensor, conductor, etc.                                      |
|                                | Corte , Desbarbe    | Recorte de los laterales de la banda de papel.  |
|                                | Limpieza            | Limpieza de la tela de formación, del fieltro, de los rodillos                                      |
|                                | Dilución            | Cajas de alimentación   |
|                                | Enfriamiento        | Rodillos guía, rodillo superior, partes mecánicas.  |
| Agua de refrigeración          | Antiespumante       | Celdas de flotación, caja de alimentación, etc.   |
|                                | Enfriamiento        | Sistemas de bombas, sistemas de accionamiento de máquinas, fluidos de lubricación, calandrado, etc. |
| Agua de caldera                | Producción de vapor | Cilindros secadores.  |
| Agua de sellado                | Sellado             | Cajas de vacío, bombas, etc.  |
| Agua de limpieza               | Transporte          | Limpieza de la máquina, depósitos en tubería, etc.  |

Tabla No.1.1 Aplicaciones del agua en la fabricación del papel.<sup>(3)</sup>

<sup>(3)</sup> [www.cnicp.org.mx](http://www.cnicp.org.mx)

## 1.4 Marco Legislativo.

---

El agua como recurso vital, ha sido tratada claramente en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos desde 1917, en el artículo 27 señala. “La propiedad de las tierras y de las **aguas** comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponden originalmente a la nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ella a los particulares, constituyendo la propiedad privada”.

Tomando como fundamento este artículo, el gobierno federal ha establecido las medidas legales para evitar la contaminación del agua de acuerdo a las facultades que el artículo 73 confiere al Congreso de la Unión para expedir leyes sobre su uso y aprovechamiento de las aguas de jurisdicción federal. Sin embargo el artículo 4° de la Constitución Política establece que “Toda persona tiene el derecho a la protección de la salud”, este artículo sienta las bases para legislar en materia de protección a la salud por efectos del medio ambiente, éste marco constitucional da la pauta para establecer las leyes generales tales como:

- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGDEEPA).
- Ley de las Aguas Nacionales.
- Ley de la Salud.

### Ley General del Equilibrio Ecológico.

En 1971 se expide la ley federal para prevenir y controlar la contaminación ambiental, este fue el primer intento a nivel nacional para establecer un marco legal y con ello proteger al ambiente. El 30 de diciembre de 1981 se expide la ley federal de protección al ambiente, la cual deroga la ley anterior, en 1983 se reformaron, para 1988 se promulga la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, en 1996 se publican las últimas reformas.

### Ley de las Aguas Nacionales.

La ley de las aguas nacionales (LAN) se expidió con el fin de reglamentar los párrafos 5° y 6° del artículo 27 de la Constitución Política, para controlar la calidad del agua, establece la participación de la federación para regular el vertido de las aguas residuales a cuerpos

de aguas nacionales. Esta ley es muy importante en la prevención y control de la contaminación del agua, en la cual se establece un sistema de permisos de descarga obligatorio para todos los responsables que vierten a cuerpos receptores de propiedad nacional.

Las obligaciones básicas de los permisionarios se concentran en: cumplir por la vía del tratamiento de las aguas residuales, de las condiciones particulares de descarga (CPD) que fija la Comisión Nacional del Agua (CNA) conforme procedimientos previamente establecidos y a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) para descargas establecidas.

En 1989, en la gaceta ecológica se publicaron las normas técnicas ecológicas que establecían los límites máximos permisibles y el procedimiento de la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de aguas provenientes de la industria, en esta etapa ya se contemplaban los contaminantes característicos de cada industria dependiendo de su giro, mismas que fueron derogadas por las NOM's (Normas Oficiales Mexicanas) en 1996.

#### Ley General de Salud.

Esta ley fue expedida en 1983 y deroga el código sanitario de los Estados Unidos Mexicanos. El artículo tercero establece que es materia de salubridad general "la prevención y control de los efectos nocivos de los factores ambientales en la salud del hombre", por tal motivo se cuenta con un capítulo de los efectos del ambiente en la salud. El artículo 118, menciona que corresponde a la Secretaría de Salud:

- Determinar los valores de concentración máxima permisible de contaminantes en el ambiente para el Ser Humano.
- Emitir las normas técnicas a que deberá sujetarse el tratamiento del agua para uso y consumo humano.
- Establecer los criterios sanitarios para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública.

Por todo lo anterior, es necesario hacer notar que la legislación y normatividad relacionada con la contaminación de aguas y las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, han tenido un objetivo principal que es pretender mantener al

ambiente lo menos contaminado posible, o tratar de mantener a los contaminantes dentro de un rango en el cual se pueda determinar que la empresa esta procurando mantener limpio el medio ambiente cumpliendo con las normas. Se debe tomar en cuenta que legalmente las empresas pueden ser multadas fuertemente por la autoridad encargada de vigilar el cumplimiento de dichas normas, y por el contrario pueden ser tomadas como industrias modelo con relación a que descargan menos contaminantes en sus aguas residuales.

#### **1.4.1 Normas Oficiales Mexicanas.**

El término "calidad del agua" es un concepto abstracto que sólo adquiere sentido cuando se selecciona un conjunto de parámetros y se les asocia un valor determinado para definirla. La amplia combinación de compuestos y valores que se pueden considerar hace que, en la práctica, se formen conjuntos en función del uso (criterios ecológicos y reglamento de agua potable), del origen (normas oficiales mexicanas de descargas) o del destino (condiciones particulares de descarga, CPD). En nuestro país existe una gran preocupación por la descarga de contaminantes en las aguas residuales y bienes nacionales por lo que tomando en cuenta el antecedente de las normas oficiales de 1994, la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publica las normas oficiales mexicanas para fines prácticos, estas son:

- NOM-001 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes pluviales independientes.
  
- NOM-002 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domesticas, pluviales, ni generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

- NOM-003. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas tratadas que se reusen en servicios al público, con el objeto de mantener al medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reuso. En el caso de que el servicio al público se realice por terceros, estos serán responsables del cumplimiento de la norma, desde la producción del agua tratada hasta su reuso o entrega incluyendo la conducción o el transporte.

Las empresas deberán cumplir con programas de descargas municipales y no municipales, así como presentar programas de acciones y obras para el control de la calidad de sus descargas, en el caso de la industria papelera tendrán que realizar sus análisis de aguas residuales en función de las normas establecidas, los parámetros y límites máximos permisibles (LMP), se muestran en la siguiente tabla No.1.2.

| Parámetro de la NOM-001             | Parámetro de la NOM-002             | Método que aplica    | LMP (NOM-001) |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------|
| pH                                  |                                     | NMX-AA-008-SCFI-2001 | 5.5-10.0      |
| Temperatura                         |                                     | NMX-AA-007-SCFI-2001 | 40°C          |
| Conductividad.                      |                                     |                      |               |
| Materia Flotante                    | Materia Flotante                    | NMX-AA-006-SCFI-2001 | Ausente       |
| Sólidos Sedimentables               | Sólidos Sedimentables               | NMX-AA-004-SCFI-2001 | 7.5 ml/l      |
| Sólidos Suspendidos                 | Sólidos Suspendidos Totales.        | NMX-AA-034-SCFI-2001 |               |
| Grasas y Aceites                    | Grasas y Aceites                    | NMX-AA-005-SCFI-2001 | 75 mg/l       |
| DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) | DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) | NMX-AA-028-SCFI-2001 | 150.0 mg/l    |
| Nitrógeno Total                     |                                     | NMX-AA-026-SCFI-2001 | 25 mg/l       |
| Arsénico                            | Arsénico                            | NMX-AA-046-SCFI-2001 | 0.75 mg/l     |
| Cadmio                              | Cadmio                              | NMX-AA-051-SCFI-2001 | 0.75 mg/l     |
| Cianuros                            | Cianuros                            | NMX-AA-058-SCFI-2001 | 1.50 mg/l     |
| Cobre                               | Cobre                               | NMX-AA-051-SCFI-2001 | 15.0 mg/l     |
| Cromo                               | Cromo Hexavalente                   | NMX-AA-044-SCFI-2001 | 0.75 mg/l     |
| Mercurio                            | Mercurio                            | NMX-AA-051-SCFI-2001 | 0.015 mg/l    |
| Níquel                              | Níquel                              | NMX-AA-051-SCFI-2001 | 6.0 mg/l      |
| Plomo                               | Plomo                               | NMX-AA-051-SCFI-2001 | 1.50 mg/l     |
| Zinc                                | Zinc                                | NMX-AA-051-SCFI-2001 | 9.0 mg/l      |
| Huevos de Helminto                  | Coliformes Fecales                  | NMX-AA-042-SCFI-2001 | 5 h/l         |

Tabla No.1.2 Normas Oficiales Mexicanas. Aplicables a la descarga de aguas residuales.

## CAPITULO II

## 2.1 Procesos de Obtención de Pulpa.

---

Todos los procesos utilizados para la obtención de pulpa tienen la misma meta, liberar a la celulosa de la lignina que la rodea manteniendo intactas las hemicelulosas y celulosas y de esta manera aumentar el rendimiento de las fibras utilizables. Las fibras obtenidas tienen un color natural que hay que blanquear antes de poderlas emplear para la fabricación del papel. El objetivo es obtener un buen color sin degradación ni pérdida de rendimiento. Existen muchos procesos y variaciones de procesos básicos que se pueden utilizar para hacer pulpa de madera. Algunos funcionan mejor con madera blanda que con la dura; otros proporcionan rendimientos altos de papeles de menor calidad; otros producen papeles superiores con rendimiento bajo, etc. Los procesos principales para la obtención de celulosa son los siguientes:

- a. Proceso al sulfato o Kraft.
- b. Proceso de madera molida (mecánico).
- c. Proceso termomecánico.
- d. Proceso semiquímico.
- e. Proceso al sulfito.

Considerando la variedad de maderas disponibles, los muchos usos del papel y la complejidad de los procesos, no es sorprendente que se distinguan:

- 5 procesos mecánicos.
- 3 procesos químicos de alto rendimiento.
- 11 procesos químicos completos y
- 2 procesos para disolver la pulpa.

Hay también la posibilidad de muchos procesos nuevos que se han propuesto, la mayor parte son técnicamente posibles, pero económicamente incosteables, como los siguientes:

- Proceso disolvente.
- Proceso con oxígeno.

- Proceso catalítico y,
- Proceso enzimático.

Tomando en consideración las muchas variantes posibles, se intentara describir sólo algunos de los procesos más importantes que sirven para procesar la madera para la formación de la pulpa, a continuación se describen:

### **Proceso Mecánico.**

Este proceso implica la reducción de la madera en su estado fibroso por medios puramente mecánicos, esto es, sin empleo de reactivos químicos, es decir los integrantes químicos originales del material fibroso quedan inalterados, excepto por la eliminación de los solubles en agua. El proceso fue desarrollado en 1843 e incluye la molienda en húmedo de la madera hasta obtener una pasta fibrosa, empleándose una piedra de carburo de silicio. En este molino los trozos de madera suaves se fuerzan contra el mortero, el cual funciona casi idénticamente a una piedra de esmeril. Al girar este medio transforma a la madera en sus componentes fibrosos, la pasta así formada es arrastrada fuera del molino por un flujo de suficiente agua que es esparcida en la superficie de la piedra para enfriarla y que a su vez absorba el calor desprendido por fricción, la temperatura en la zona de molido puede llegar a más de 150°C. La pasta obtenida es depurada en cribas centrifugas y de aquí se envía a una operación de blanqueo en donde se trata con una solución de hidrosulfito de zinc.

Es posible modificar las características de la piedra de molienda para producir pulpas "hechas a la medida" para cada uso específico. Las pulpas de madera molida para fieltros de techos o pisos deben ser muy gruesas y de fácil drenaje y requieren una piedra de gránulos grandes, mientras las pulpas para papel periódico (contiene un 80% de pulpa mecánica) son muy finas y se preparan con piedras de gránulo chico. Las características de las pulpas también pueden variarse cambiando:

- El tipo de superficie de la piedra
- La velocidad de rotación
- La presión de los troncos contra la superficie y,
- La temperatura de la suspensión acuosa de la pulpa.



Por lo general, se obtiene una pulpa más gruesa y de mejor drenaje con una superficie áspera, velocidades altas y con presiones y temperaturas elevadas. Otros factores a considerar son el tipo y la condición de la madera, pero las pulpas de madera molida suelen prepararse con especies de coníferas de fibras largas, pues las especies caducas de fibras cortas producen pulpas muy débiles.

### **Proceso Químico Termomecánico (CTMP).**

Este tipo de proceso se inicia al introducir la materia prima celulósica, bagazo desmedulado de caña de azúcar o astillas de madera en una tolva, la cual se descarga a un alimentador de tornillo, este alimentador tiene como objetivo forzar a que entre el material celulósico por un tubo digestor, el cual se encuentra presurizado por la adición de sosa/sulfito de sodio a fin de que a su paso a través del digestor provoque una deslignificación moderada en la madera o del bagazo. La adición simultánea de vapor y reactivos químicos conlleva a instalar menor potencia en la etapa de desfibrado del proceso. La pasta ablandada que sale del digestor, es lavada y depurada para que se desfibre en un tándem (tandeo) de refinadores de doble disco. Dependiendo del mercado, la pulpa cruda obtenida puede laminarse para venta o bien blanquearse utilizando peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ).

El proceso termomecánico tiene la ventaja de que a temperaturas elevadas se suaviza la lignina y hace menos difícil la molienda mecánica. La madera se trata con vapor a más o menos 975 kPa, y la refinación se efectúa a temperatura elevada (170°C). La fibra obtenida está cubierta de lignina y es muy adecuada para cartón, pero el papel que se obtiene es de mala calidad.

### **Proceso al Sulfito.**

La lignina reacciona con el ión bisulfito ( $HSO_3^-$ ) en condiciones ácidas, formando lignosulfonatos solubles en agua. Durante muchos años este fue el proceso preferido debido a que se obtienen pulpas de color claro que se blanquean con facilidad, los materiales químicos son baratos, no es necesario recuperarlos y es un proceso de operación muy simple. Aunque la producción de pulpa al sulfito ha permanecido casi constante, el rápido crecimiento de la pulpa kraft ha reducido su proporción del total a menos del 10% de la pulpa química fabricada. Esto se debe a varias razones, pero las principales son la imposibilidad de cocinar maderas resinosas como la del *pino*, los

problemas para obtener pulpas fuertes a partir de maderas duras y la imposibilidad de utilizar sistemas de recuperación como los del proceso kraft para reducir los problemas de contaminación del agua. No obstante, este proceso produce pulpas de características especiales tales como los grados de celulosa de alto contenido que se consumen en la fabricación del rayón, por lo que todavía continúa usándose.

Al principio se usaba calcio como álcali principal, debido a que es poco costoso y muy conveniente. Sin embargo, puesto que no se cuenta con un sistema de recuperación, la mayoría de los procesos a base de calcio suspendieron sus operaciones o bien han cambiado a sodio, magnesio o amoníaco, para los que si existen sistemas de recuperación.

Los requerimientos de energía son elevados. El proceso normal de sulfito consiste en la digestión de la madera en solución acuosa que contiene bisulfito de calcio y un exceso de dióxido de azufre. El proceso con sulfito tiene dos tipos principales de reacciones que probablemente son concurrentes:

1. La sulfonación y solubilización de la lignina con el bisulfito y,
2. La división hidrolítica del complejo celulosa-lignina.

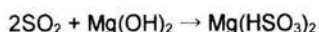
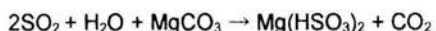
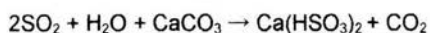
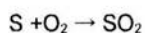
Cualquiera que sea la base utilizada, la etapa inicial consiste en quemar azufre en un tanque calentado por un quemador rotatorio y luego se alimenta a este quemador para su oxidación, el azufre que se volatiliza en el quemador entra a una cámara de combustión donde se oxida para producir dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). El suministro de aire al quemador debe controlarse muy bien, pues un exceso ocasiona la formación de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y por lo tanto la subsecuente aparición del ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). El dióxido de azufre obtenido debe de enfriarse con rapidez desde los  $1000^\circ\text{C}$  que tiene a la salida del quemador hasta menos de  $400^\circ\text{C}$ , para minimizar la formación de  $\text{SO}_3$ , esto se realiza en un enfriador vertical u horizontal que consta de un sistema de tubos rodeados de agua. Después de enfriar a  $20\text{-}30^\circ\text{C}$  el  $\text{SO}_2$  gaseoso se absorbe en agua y se hace reaccionar con la base adecuada (calcio, magnesio o amonio). En el caso de los licores de calcio, el gas se hace pasar a través de torres empacadas con piedra caliza con un flujo de agua en el interior de la torre. Debido a la solubilidad limitada del bisulfito de calcio  $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ , el pH del licor es muy bajo (aproximadamente 2) y siempre esta presente el ácido sulfuroso

libre. A este proceso se le suele llamar método de sulfito ácido, como ya se menciono anteriormente, las fábricas que usan calcio prácticamente han desaparecido.

En la actualidad se usan las bases solubles, que tienen ciertas ventajas específicas, puesto que las sales de bisulfito de sodio, magnesio y amonio, son solubles a un pH de 4.5, pero el método preferido consiste en procesar la pulpa a un pH más alto, a este método se le conoce como pulpa al sulfito. Con el sulfito ácido se requieren tiempos de cocción muy prolongados (7-10h) mientras que son suficientes de 4-5h para el bisulfito.

La base de sodio es la preparación más fácil (por lo general se usa  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o  $\text{NaOH}$  como producto de reposición) y produce la pulpa de calidad más alta. Sin embargo, aunque existen métodos de recuperación, son complicados y muy costosos. La base de magnesio (a partir de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) es de manejo más difícil pero se dispone de buenos sistemas de recuperación, en la actualidad la mayor parte de la pulpa al sulfito se fabrica con este proceso.

Aunque muy usada en el pasado, la base de amonio (con  $\text{NH}_4\text{OH}$ ), ha perdido vigencia. Aunque no se puede recuperar el amoniaco, es posible evaporar y quemar el licor sin dejar residuos sólidos, por lo que hay pocos problemas de contaminación. Mientras el amoniaco acuoso siga siendo de bajo costo este proceso continuara teniendo aplicaciones, pues el  $\text{SO}_2$  puede recuperarse de los gases de desperdicio lavándolos en un sistema con solución de hidróxido de amoniaco. Las reacciones esenciales que se efectúan durante la preparación del licor de cocción son relativamente sencillas:



En el proceso al sulfito se suelen usar digestores por lotes. Las temperaturas de cocción son mas bajas ( $140\text{-}150^\circ\text{C}$ ) y los tiempos son más prolongados. El rendimiento de pulpa es similar al del proceso kraft.

Las especies preferidas para cocinarlas con licor de sulfito son el abeto, pinabate y bálsamo, debido a que producen pulpas relativamente fuertes y de color claro. Casi un 20% de papel periódico es de este tipo de pulpa sin blanquear. Se han hecho muchas investigaciones para desarrollar productos a partir del licor de desperdicio de sulfito y, en algunos casos, se ha logrado tener éxito. Se pueden obtener como subproductos la vainillina, alcoholes y levadura de torula, mientras que los lignosulfonatos se usan como modificadores de viscosidad en lodos de perforación y aplicaciones similares. Sin embargo la mayor parte del licor gastado se quema para recuperar los productos químicos y los valores caloríficos.

### **Proceso Semiquímico con Sulfito Neutro (SQSN).**

La idea de la pulpa semiquímica, aparentemente fue expresada primero por Mitscherlich, en 1874, en un proceso que implicaba el ablandamiento de las astillas de madera con ácido sulfuroso o bisulfito, seguido por fricción o molienda para convertirlas en pulpa. Un poco después, en 1880, C.F. Cross reportó el uso del sulfito de sodio para la obtención de pulpa. Este reactivo tuvo éxito comercial en la década de 1920 para producir pulpas resistentes, de colores ligeros, a partir de maderas duras y maderas suaves, pero los problemas de la recuperación del reactivo y de corrosión del equipo no pudieron ser resueltos en aquel tiempo. El desarrollo de la obtención de pulpas semiquímicas, para las que el sulfito de sodio ha resultado a ser particularmente adecuado, ha hecho que este producto químico sea ahora importante.

Este proceso se basa en usar fragmentos de madera, por lo general dura, que se cocinan con licor de  $\text{NaSO}_3$  regulado con  $\text{NaHCO}_3$  o  $\text{NaOH}$ , para mantener un pH ligeramente alcalino durante la cocción. La pulpa sin blanquear obtenida de maderas duras, cocinadas con un rendimiento de un 75%, se utiliza mucho para empaques corrugados, cajas *liner* y papel. Aunque se pueden obtener pulpas blanqueadas con éste método, se requieren grandes cantidades de agentes químicos para lograrlo y los licores de desperdicio son de recuperación difícil. En la actualidad muchas fábricas de SQSN están situadas en las cercanías de las instalaciones tipo kraft, para poder tratar los licores en los mismos hornos. De esta forma, el licor gastado del proceso SQSN constituye el material de reposición del sistema kraft, resolviéndose así el problema de los desperdicios.

La pulpa SQSN de maderas duras es el material principal para empaques corrugados y no tienen competencia de otros procesos. Las pulpas semiquímicas suelen producirse remojando la madera en soluciones de NaOH o Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, para después procesarlas en refinadores de discos y obtener una pulpa del tipo de madera molida. El consumo de productos químicos es muy bajo y los rendimientos son del orden de 85-96%, se trata de mejorar este método para aumentar la calidad de la pulpa obtenida.

### **Proceso Disolvente.**

El proceso de elaborar pulpa con disolventes empleando una variedad de ellos como etanol, fenol y otros agentes designificadores que no contienen azufre continúan apareciendo. El proceso *holopupa* desarrollado por el Institute of Paper Chemistry emplea dióxido de cloro como agente para obtener la pulpa. Se han sugerido sistemas de obtención de pulpa utilizando oxígeno directo y ácido nítrico. Una de las ideas más interesantes es el uso de antraquinona en pequeñas cantidades como catalizador en los procesos comunes de fabricación de pulpa para darle mayor rapidez. Algunos de estos procesos han llegado al estado de plantas piloto, pero las compañías importantes de papel tienen muy poca inclinación a arriesgarse con nuevos proyectos, aun cuando hay ahorros aparentes de energía y la posibilidad de nuevos subproductos vendibles.

### **Procesos Comerciales.**

La mayoría de las pulpas comerciales se producen mediante la utilización de relativamente pocos productos químicos que contienen azufre, oxígeno y álcali; y éstos existen en varios estados químicos diferentes y en una variedad de sistemas, como se muestra en la figura 2.1 y en la tabla No.2.1, donde se describen algunos de los procesos más importantes. En este esquema se pueden incluir procesos adicionales bajo una gran variedad de nombres. Sin embargo entre ellos no difieren grandemente, como se muestra en la figura, los compuestos de azufre se utilizan en todo el rango de pH cubierto por los diferentes procesos de obtención de pulpas, y los grupos químicos que derivan de estos compuestos en solución acuosa, corresponden a los niveles específicos que se mantienen en dichos procesos. Las principales variables de reacción que se estudian en los procesos de obtención de pulpa son:

- Composición celulósica y concentración del licor.
- Temperatura.

- Tiempo de digestión.
- Presión y pH.

La interacción de los compuestos de azufre con la lignina, junto con la velocidad de hidrólisis regida por el pH, controla, en gran parte el curso de la acción del proceso. Los efectos de la hidrólisis ácida disminuyen a medida que el pH del sistema se mantiene más cerca de la neutralidad. Bajo estas condiciones, se presentan menos rompimiento hidrolítico de la lignina y de los carbohidratos. De lo que se deduce que con sistemas al sulfito neutro se obtiene un alto rendimiento de pulpa. Las maderas duras (en general poseen un contenido más alto de hemicelulosas y más bajo de lignina que las maderas suaves), resultan de este modo ser las especies más favorables para ser procesadas con sulfito neutro. En el proceso semiquímico de obtención de pulpas a partir de maderas duras, se obtiene una alta retención de hemicelulosas. A los niveles más altos de pH, muchas de las hemicelulosas (longitudes más cortas de cadenas) se disuelven en el licor de cocción. Las maderas que contiene altos porcentajes de resina y grasas, se procesan con más efectividad en medio alcalino, en el cual estos compuestos se solubilizan por saponificación. Los sistemas al sulfito difícilmente afectan las grasas y a las resinas, lo cual puede ser una fuente de dificultades, en la fabricación del papel.

La composición del licor y el pH están interrelacionados, para los licores, no obstante, la relación de los álcalis (sulfito de sodio e hidróxido de sodio) puede tener grandes variaciones sin afectar el pH. Para los sistemas sulfito-bisulfito, las consideraciones de equilibrio y de pH son de mayor importancia. La composición del licor al sulfito ácido se afecta por presión y temperatura, debido a la presencia de bióxido de azufre (componente volátil). También se sabe que las maderas involucradas, principalmente los pinos, contienen ciertas estructuras químicas que inhiben la sulfonación en el proceso al sulfito.

El movimiento de los reactivos químicos en la madera durante la obtención de las pulpas químicas es uno de los factores más importantes tanto en los procesos químicos como en los semiquímicos. En general, dicho movimiento tiene que lograrse antes de que se alcancen las temperaturas máximas de reacción, el calentamiento de la madera en ausencia de productos químicos, puede ser perjudicial.

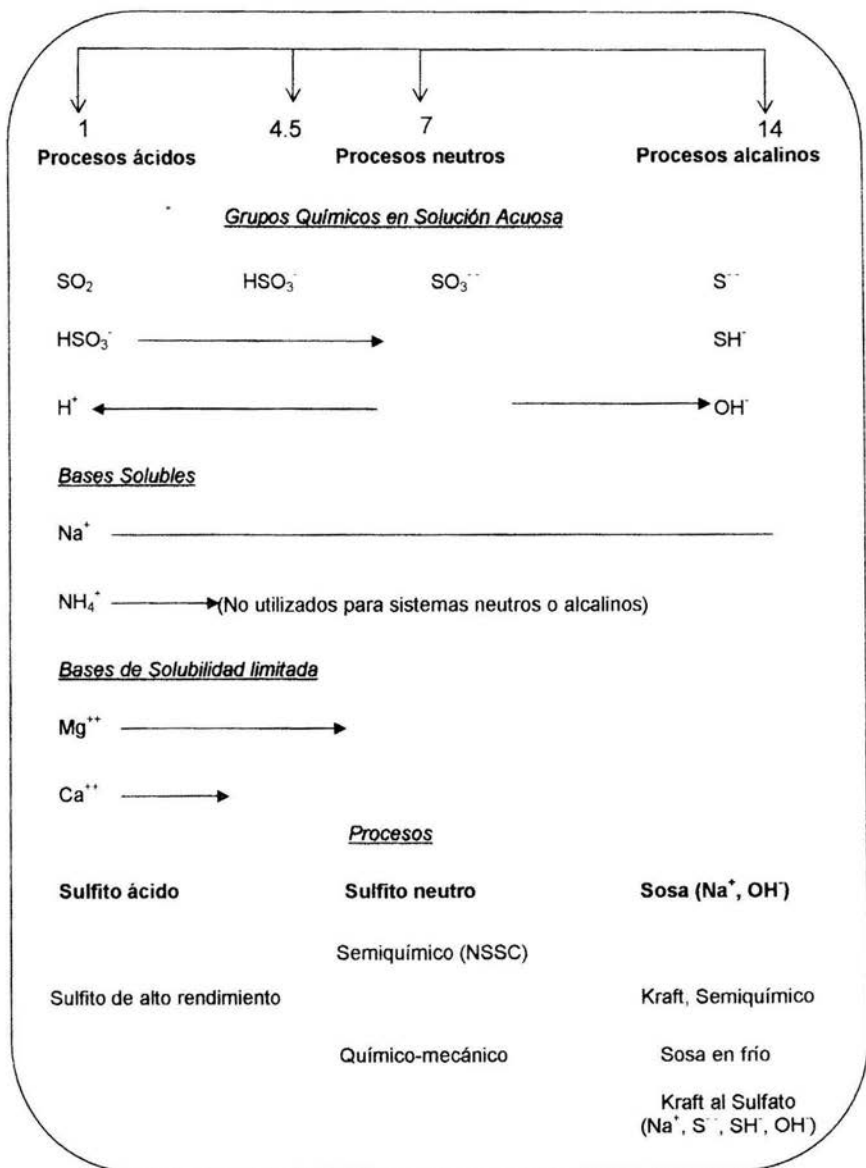


Fig. 2.1 Sistemas acuosos de obtención de pulpas.

| Forma de la Madera                                | Nombre Común                   | Tratamiento Químico   | Tratamiento Mecánico         | Rendimiento en Pulpa (%) |
|---|--------------------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| <b>Mecánico</b>                                   |                                |   |                              |                          |
| Tarugos   | Madera molida, fría y caliente | Ninguno   | Piedra de molino             | 93-98                    |
| Astillas  | Refinador mecánico (RMP)       | Ninguno   | Refinador de disco           | 93-98                    |
| Astillas  | Masonite                       | Vapor   | Expansión de vapor           | 80-90                    |
| Astillas  | Asplund (Fibra burda)          | Vapor   | Refinador de disco           | 80-90                    |
| Astillas  | Termomecánica (TMP)            | Vapor   | Refinador de disco (presión) | 91-95                    |
| <b>Químico mecánico y, Quimicotermodomecánico</b> |                                |   |                              |                          |
| Tarugos   | Madera molida vaporizada       | Vapor   | Piedra de moler              | 80-90                    |
| Tarugos   | Madera molida, proceso Decker  | Sulfito ácido (Ca, Na, Mg)  | Piedra de moler              | 80-90                    |
| Tarugos   | Madera molida, proceso Fish    | Kraft   | Piedra de moler              | 85-90                    |
| Tarugos   | Madera molida químicamente     | Sulfito neutro  | Piedra de moler              | 80-90                    |
| Astillas  | Sosa fría                      | Sosa Caustica   | Refinador de disco           | 80-90                    |
| Astillas  | Sulfito alcalino               | Sulfito alcalino  | Refinador de disco           | 80-90                    |
| Astillas  | Quimicotermodomecánica         | Vapor + Productos químicos  | Refinador de disco (presión) | 65-85                    |
| <b>Semiquímica</b>                                |                                |   |                              |                          |
| Astillas  | Sulfito neutro (NSSC)          | $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3$ | Refinador de disco           | 65-90                    |
| Astillas  | Kraft                          | $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$                            | Refinador de disco           | 75-85                    |
| Astillas  | Licor verde                    | $\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{CO}_3$                    | Refinador de disco           | 65-85                    |
| Astillas  | Sosa                           | Hidróxido de Sodio (NaOH)   | Refinador de disco           | 65-85                    |
| Astillas  | Sin azufre                     | $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$                            | Refinador de disco           | 65-85                    |
| <b>Químico de Alto Rendimiento</b>                |                                |   |                              |                          |
| Astillas  | Kraft (Sulfato)                | $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$                               | Refinador de disco           | 55-65                    |
| Astillas  | Sulfito                        | Sulfito ácido (Ca, Na, Mg)  | Refinador de disco           | 55-70                    |
| Astillas  | Sulfito                        | Bisulfito (Na, Mg)  | Refinador de disco           | 55-70                    |

Tabla No. 2.1 Clasificación de los procesos de producción de la pulpa



| Forma de la Madera          | Nombre Común              | Tratamiento Químico                          | Tratamiento Mecánico | Rendimiento |
|-----------------------------|---------------------------|--|----------------------|-------------|
| <b>Totalmente Químico</b>   |                           |  |                      |             |
| Astillas                    | Kraft (Sulfato)           | Na <sub>2</sub> S + NaOH                     | Suave o ninguno      | 40-55       |
| Astillas                    | Polisulfuro (una etapa)   | (NaOH + Na <sub>2</sub> S)x                  | Suave o ninguno      | 45-60       |
| Astillas                    | Polisulfuro (dos etapas)  | Pretratamiento H <sub>2</sub> S, Kraft       | Suave o ninguno      | 45-60       |
| Astillas                    | Sosa                      | Sosa Caústica                                | Suave o ninguno      | 40-55       |
| Astillas                    | Sosa-AQ                   | NaOH + Antraquinona                          | Suave o ninguno      | 45-55       |
| Astillas                    | Sosa-Oxígeno (dos etapas) | NaOH; Oxígeno                                | Refinador de disco   | 45-60       |
| Astillas                    | Sulfito ácido             | Sulfito ácido (Ca, Na, Mg, NH <sub>3</sub> ) | Suave o ninguno      | 45-55       |
| Astillas                    | Bisulfito                 | Bisulfito (Na, Mg, NH <sub>3</sub> )         | Suave o ninguno      | 45-60       |
| Astillas                    | Magnesita                 | Bisulfito de Magnesio                        | Suave o ninguno      | 45-60       |
| Astillas                    | Sulfito neutro            | Sulfito neutro                               | Ninguno              | 45-55       |
| Astillas                    | Sulfito multietapas       |  |                      |             |
|                             | Stora                     | Sulfito-bisulfito; SO <sub>2</sub>           | Ninguno              | 45-55       |
|                             | Svola                     | Sulfito; sulfito alcalino                    | Ninguno              | 45-55       |
|                             |                           |  |                      |             |
| <b>Pulpa para Dissolver</b> |                           |  |                      |             |
|                             |                           |  |                      |             |
| Astillas                    | Prehidrólisis Kraft       | Prehidrólisis Kraft                          | Ninguno              | 35          |
| Astillas                    | Sulfito                   | Sulfito ácido (Ca, Na)                       | Ninguno              | 35          |
|                             |                           |  |                      |             |
|                             |                           |  |                      |             |

Tabla No. 2, 1 Clasificación de los procesos de producción de la pulpa (Cont.)

### Preparación de la Pulpa.

En la década de 1930 se inventaron los procesos continuos aplicados a las astillas de madera. Estos procesos implican un tratamiento con vapor, seguido por la desfibración a presión elevada o atmosférica para lograr una pulpa burda aplicable a la producción de lámina de fibra o papeles para techar. Hacia 1950 apareció el método de producción semiquímica de pulpa en donde se utiliza un tubo digestor horizontal continuo aplicable a la etapa química del proceso. La producción química continua se llevó a cabo por vez primera en 1960, durante el periodo de desarrollo se propusieron varios sistemas y configuraciones del digestor, sistemas que parecen haberse estabilizado en la forma siguiente:

- Digestores verticales de flujo descendente con impregnado e inmersión de las astillas (fundamentalmente kraft).
- Flujo descendente, producción de pulpa con una fase al vapor (fundamentalmente semiquímico).
- Tubos inclinados con submersión de la materia prima (fundamentalmente aserrín).
- Digestores de tubo horizontal (fibras semiquímicas y de plantas no madereras)

Las ventajas mencionadas a cerca de los digestores continuos consisten en que requieran menos energía, siendo mejor su adecuación ecológica (control de gas del digestor); por su mayor flexibilidad se prefieren los sistemas intermitentes, por su confiabilidad en la producción, así como sus costos de mantenimiento más bajos.

Los procesos de preparación de la pulpa (cocción) se lleva a cabo tradicionalmente en operaciones por lotes con recipientes a presión (*digestores*). Las condiciones usadas dependen del tipo de madera y de la calidad deseada en el producto final. Los digestores son de forma cilíndrica con una bóveda en la parte superior y un fondo cónico, los tamaños llegan hasta 12m de altura y 6m de ancho, los mayores tienen capacidad hasta para 200m<sup>3</sup> de madera triturada (aproximadamente 31 ton.) por carga. Los trozos de madera se alimentan a través de una válvula grande en la parte superior y, al final del cocimiento, se descargan por el fondo a través de una válvula y se reciben en un tanque. Durante la cocción, el licor se calienta circulando por un intercambiador de calor, que también evita la dilución durante la cocción que se presenta al calentar por inyección directa de vapor.

En los últimos años, el desarrollo del digestor continuo ha constituido un factor muy importante, en especial en la industria kraft. Los fragmentos de madera se alimentan continuamente en la parte superior a través de un alimentador especial de alta presión, y la pulpa cocinada se extrae continuamente por el fondo, a través de una unidad especial de evacuación. Las instalaciones más recientes varían en tamaño hasta 45m de altura y son capaces de producir hasta 100 ton de pulpa diaria por unidad. Los licores de cocción y las condiciones del proceso son prácticamente iguales a las de las unidades por lotes. Estos digestores producen una buena economía en la producción de pulpa y tienen ciertas ventajas de calidad con respecto a los digestores por lotes. Sin embargo, las fábricas de reciente instalación pueden ser de ambos tipos. Debido a la alta carga alcalina, los productos químicos deben ser recuperados y usados, esto también ayuda a los problemas de contaminación, pues el rendimiento de la pulpa es de sólo un 45% del peso original de madera y es necesario eliminar los residuos. Después de cocinarla en el digestor, la pulpa se lava a contracorriente en un sistema de lavado rotatorio al vacío utilizando tres o cuatro etapas. De esta manera la pulpa queda lista para blanquearla o usarla en papeles para bolsas en donde el color café no es objetable.

## 2.2. Métodos de blanqueo para la pulpa.

---

Hasta finales del siglo XVIII, el blanqueo de las fibras vegetales se lograba por medio de la acción de la luz solar sobre las fibras humedecidas, con lo cual se liberaba lentamente oxígeno y los pigmentos naturales o materiales colorantes se volvían incoloros, se solubilizaban en agua, o se destruían. Se utilizaba la exposición repetida a la luz solar, con maceraciones intermedias en soluciones de álcali, obtenidas a partir de las cenizas de la madera de algas y de otros materiales vegetales, finalmente se hacía un tratamiento con ácido láctico proveniente de la leche agria. La mayor parte del material que se blanqueaba estaba constituido por fibras de lino, el algodón se consideraba suficientemente blanco y otras fibras como el cáñamo y yute se consideraban demasiado difíciles de blanquear.

En 1774, ocurrió un acontecimiento que hizo época en la industria textil, papelera y química; el descubrimiento del cloro elemental, el químico francés Berthollet descubrió que el cloro era absorbido por soluciones de potasa o carbonatos cáusticos para dar soluciones que tenían una acción blanqueadora satisfactoria, desde el punto de vista de un blanqueo rápido y económico, otro gran soporte para el blanqueo fue el descubrimiento de Charles Tennant de Escocia respecto a la formación del hipoclorito de calcio por la reacción del gas cloro con la lechada de cal.

El proceso al sulfito generalmente da las pulpas crudas más blancas, el color de esta pulpa puede ir desde crema pálido hasta un marrón oscuro para la pulpa al sulfato (kraft), a la sosa o semiquímicos, las pulpas mecánicas ocupan una posición intermedia. Aún cuando el proceso de la pulpa elimina del 75-90% de la lignina, el resto junto con otros productos coloridos resultantes de la degradación, tienen que eliminarse por blanqueo. Aunque es posible mejorar la brillantez (blancura) de la pulpa en una sola etapa, el proceso más económico se basa en varias etapas. Los métodos actuales usan algunas de las siguientes combinaciones de cloración con:

- Cloro elemental (C)
- Extracción alcalina con hidróxido de sodio (E)
- Diversas etapas de cloración usando hipoclorito de sodio o calcio (H)

- Dióxido de cloro (D)
- Peróxido de Hidrógeno (P)

La pulpa se lava después de cada etapa para extraer las impurezas solubilizadas. Existen muchas combinaciones posibles y cada instalación selecciona la secuencia que mejor se adapta a sus necesidades. Las más comunes son:

- CEH
- CEHD
- CEHDP
- CED
- CEDED
- CEHDED

Mientras mayor sea el número de etapas más alta será la calidad del producto, aunque el costo también será mayor. Las pulpas al sulfito se blanquean con más facilidad y por lo general sólo requieren una secuencia de tres o cuatro etapas, mientras que las pulpas kraft casi siempre necesitan etapas adicionales. En la Tabla No.2.2 se muestran las condiciones típicas para blanquear pulpa kraft.

| <b>Etapas</b>       | <b>% Productos químicos en la pulpa</b> | <b>pH De las soluciones</b> | <b>Tiempo (min)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
|---------------------|---|-----------------------------|---------------------|-------------------------|
| Cloración ácida     | 5-6                                     | 2 – 4                       | 30                  | 21                      |
| Extracción alcalina | 2.5-3                                   | 11 - 11.5                   | 60                  | 60                      |
| Hipoclorito         | 1-2                                     | 9 – 10                      | 90                  | 40                      |
| Dióxido de Cloro    | 0.5-1                                   | 3 – 5.5                     | 240                 | 72                      |

Tabla No.2.2 Condiciones típicas para blanquear pulpa Kraft.

El cloro y la sosa cáustica se compran, pero el dióxido de cloro tiene que generarse en la planta usando clorato de sodio como producto básico.

*Cloración:* En este paso a una suspensión de pulpa en agua se agrega cloro elemental en solución o en fase gaseosa, esto origina la cloración de la pulpa, este paso contribuye

notablemente a la separación de la lignina, pero no constituye una verdadera acción de blanqueo puesto que la pulpa no se blanquea. Es una continuación del tratamiento de purificación iniciado en la etapa de digestión. La reacción procede muy rápidamente y durante los primeros 15 minutos se consume del 80 al 90% del cloro agregado. La utilización eficiente de la mayor parte del reactivo aconseja un agotamiento más completo, y por consiguiente se propicia un tiempo de retención de 45 a 60 minutos. Aumentando la dosificación de reactivo se prolongara el tiempo requerido para la terminación de la reacción. Incrementando la temperatura, se acortara el tiempo, sin embargo esto puede tener un efecto adverso sobre la calidad de la pulpa. Después de la cloración, la pulpa clorada debe lavarse completamente para eliminar el ácido clorhídrico y también los productos orgánicos clorados, solubles, formados durante la operación.

*Extracción alcalina:* En el blanqueo de las pulpas químicas, generalmente se usa un paso de cloración como primera etapa de separación de la mayor cantidad posible de lignina, antes de un blanqueo oxidante. No obstante, el lavado subsecuente de la pulpa clorada sólo separará aproximadamente la mitad de las ligninas cloradas. Las que quedan no son solubles en el licor ácido formado en este paso y son sólo ligeramente solubles en agua. Para que los siguientes pasos oxidantes puedan ser más efectivos, es necesario separar la mayor cantidad posible de ligninas cloradas, puesto que estos materiales, de por sí, pueden ser oxidados y consumir agentes oxidantes de blanqueo. La mayoría de estos materiales son relativamente solubles en soluciones alcalinas calientes, lo que, en una secuencia de blanqueo en varios pasos ha conducido al uso de uno o más pasos de extracción alcalina. Los datos de viscosidad han demostrado consistentemente que esta extracción alcalina no tiene efecto sobre la resistencia de la pulpa, es decir, que en la celulosa no se produce una degradación apreciable.

El hidróxido de sodio se usa exclusivamente para mantener la alcalinidad en esta etapa. En pruebas experimentales, se han empleado álcalis tales como carbonatos, metasilicatos y sulfuros de sodio. Se ha encontrado que el hidróxido de calcio es inapropiado debido a la precipitación de las ligninas cloradas. Las reacciones en la etapa de extracción alcalina pueden ser sumamente variadas tales como: difusión, solvatación y fenómenos relativos, precedidos o seguidos por reacciones hidrolíticas, oxidantes y de deshidratación. Sin embargo, la función primordial en esta etapa sigue siendo la eliminación de compuestos clorados, solubles en álcali, para efectuar una utilización más eficiente de los agentes

oxidantes de blanqueo en los pasos subsecuentes. Los resultados reportados sobre la extracción alcalina de las pulpas cloradas indican que reduciendo la demanda de cloro en las etapas posteriores, se obtiene bastante resistencia en la pulpa sin afectar sus cualidades para la fabricación de papel. En el caso de pulpas kraft o al sulfato, el paso de extracción alcalina es bastante específico en la eliminación de sustancias del tipo de los colorantes, así como el de los residuos clorados presentes. A temperaturas elevadas, generalmente se obtienen ciertas mejoras en las cualidades del blanqueo de la pulpa, incrementan la velocidad a la cual la lignina clorada y otras incrustaciones, solubilizados en álcali, se pueden eliminar de la fibra.

*Hipoclorito:* Los hipocloritos de calcio o de sodio en el blanqueo de la pulpa generalmente se usan junto con otros reactivos en un blanqueo de varios pasos. Puesto que los hipocloritos no son específicos para la lignina y otras impurezas, se deben de escoger las condiciones para lograr el ataque químico de estos materiales y reducir al mínimo su acción sobre la celulosa. Muchos investigadores han estudiado los efectos degradantes de los hipocloritos cuando se usan como agentes oxidantes especialmente a diferentes niveles de pH. La temperatura de la suspensión de pulpa depende primordialmente de los valores de consistencia y del pH. Un aumento de temperatura incrementará la velocidad de reacción (aproximadamente al doble por cada aumento de 7.5°C). A mayores consistencias, la concentración de reactivos será mayor y, por consiguiente, se efectuará una reacción más rápida.

*Bióxido de cloro:* El uso de esta sustancia como agente de blanqueo para las pulpas químicas, ha aumentado considerablemente en los últimos años. La amplia aceptación de este agente de blanqueo se debe a la propiedad característica que posee de atacar y oxidar a la lignina sin atacar a la celulosa. El poder oxidante de esta sustancia en comparación con el cloro es de 1 a 2.6, en peso. El bióxido de cloro generalmente se usa para un blanqueo final que permite obtener pulpas con valores de blancura sumamente altos, en rangos que no se pueden alcanzar con otros agentes de cloración una degradación sería del material celulósico. Las temperaturas prácticas de operación varían, pero los blanqueos se completan en un tiempo razonable y con un consumo de reactivos eficiente.

*Peróxido:* La utilización de los peróxidos de sodio e hidrógeno para el blanqueo de pulpas, ha sido comercialmente aceptada durante muchos años. Cuando estos reactivos se emplean al mismo pH, reaccionan de manera similar. El peróxido actúa sobre materias colorantes de la pulpa y no produce cambios apreciables en la celulosa ni en la lignina. Los peróxidos también son efectivos como uno de los pasos finales durante el blanqueo de las pulpas químicas a valores elevados de blancura. El requerimiento de blancura de la pulpa, determina la cantidad de reactivos que se le agrega. Al usar peróxidos en el blanqueo se requieren reactivos adicionales para ajustar el pH y estabilizar la solución, algunos de ellos son: Hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, silicato de sodio, sulfato de magnesio, bióxido de azufre, etc.

*Agentes reductores:* Este tipo de agentes se ha restringido bastante a las pulpas tipo pasta mecánica y a la sosa en frío. En operaciones comerciales, se están usando los hidrosulfitos de sodio y de zinc. Recientemente en varios laboratorios se ha investigado otro agente reductor, el borohidruro de sodio. Este reactivo se ha utilizado para blanquear las pulpas tipo mecánica y a la sosa en frío, y también como un paso final en el blanqueo de las pulpas químicas. Los hidrosulfitos, el de sodio y el de zinc, se emplean en porcentajes de hasta un 5%, produciendo incrementos de blancura, para fines prácticos, las temperaturas de blanqueo generalmente están comprendidas entre 70 y 95°C, y el tiempo de retención es de 2 horas. Los agentes quelatantes, tales como el ácido etilendiaminatetracético, están encontrando amplia aplicación junto con los hidrosulfitos.

El blanqueo con agentes selectivos que destruyen al menos una parte de los grupos cromofóricos sin ser materialmente consumidos por el cuerpo de la lignina se utilizan para pulpas con alto contenido de lignina tales como la pulpa mecánica, pulpa químico-mecánica, a la sosa en frío y semiquímicas. En estos casos la deslignificación no es deseable, ya que disminuiría materialmente el rendimiento.

Los nuevos desarrollos se basan en remplazar las etapas de cloración y de extracción con una sola etapa que usa oxígeno gaseoso e hidróxido de sodio. La pulpa se deshumidifica hasta un nivel de 15-25% de sólidos, se trata con 4-6% de NaOH y se hace pasar por un reactor donde se trata con oxígeno gaseoso a unos 10 Kg/cm<sup>2</sup> de presión. La pulpa consume de 1-2% de oxígeno durante 15 min. y se obtiene semi-blanqueada. Después de lavarla, la etapa convencional de dióxido de cloro produce el nivel de blancura



deseado. La ventaja de este proceso radica en que el efluente no contiene cloruros y puede usarse en el proceso de preparación de la pulpa. El sodio y los materiales orgánicos que puedan existir en el efluente entran en el ciclo de recuperación del proceso kraft y sirven como material de reposición, lo que reduce los problemas de contaminación. La desventaja obvia es la introducción de un nuevo proceso, que implica equipo adicional, pero también existe más degradación, pues el oxígeno ataca tanto a la celulosa como a la lignina.

Estas secuencias de blanqueo están diseñadas para separar la lignina, produciendo una fibra de alta pureza, constituida únicamente por el material de carbohidrato. Cuando se fabrican pulpas de alto rendimiento como las de madera molida, donde toda la lignina queda en el producto final, no es posible aplicar estos procesos. Sin embargo no se requiere una blancura excepcional, por lo que se pueden obtener ciertas mejoras usando una etapa como la del peróxido o del hidrosulfito (diotinita). La acción de estos materiales no produce pérdidas de rendimiento, pues se trata de una simple decoloración de la pulpa y no de una eliminación de impurezas. Por lo general un 0.5% de cualquiera de estas sustancias producirá un aumento notable de la brillantez por tal motivo este método se ha generalizado bastante para mejorar la calidad de las pulpas de madera molida.

Una blancura alta no es la única característica importante de las pulpas blanqueadas. Una buena pulpa para papel debe tener, también buena resistencia y buenas propiedades para la fabricación del papel, y es importante que estas propiedades no se pierdan en el proceso de blanqueo. En el caso de pulpas para disolver, que son altamente purificadas, las propiedades de una buena reactividad, alto contenido de alfa-celulosa, viscosidad apropiada, y buenas características de hinchamiento, son aún más importantes que los valores elevados de blancura.

## 2.3 Proceso Kraft o Sulfato.

---

Los registros históricos indican que el origen de la industria de la pulpa Kraft, o al sulfato, se debió a la ligereza de un operario de digestores, en Suecia. Esta fábrica estaba produciendo pulpa de acuerdo con las patentes otorgadas a C.F. Dahl, en Alemania, en 1879. Por un error uno de los digestores se descargó antes de que las astillas estuvieran completamente cocidas, y cuando la madera parcialmente cocida estaba a punto de tirarse al río, el superintendente decidió pasar las astillas a un molino con la idea de hacer un papel de inferior calidad. El resultado, sin embargo, fue un papel que sobrepasaba en resistencia a cualquier papel previamente obtenido, y la cocción incompleta llegó a ser, tiempo después, la práctica regular en muchas fábricas para la producción de un papel envoltura que era tan resistente en comparación con otros papeles de envoltura, que recibió el nombre de **Kraft**, que en sueco y alemán significa **fuerte**. A pesar de que fue el último proceso químico que se inventó para la obtención de la pulpa ha llegado a dominar por más de 100 años, alcanzando un nivel casi del 70% de la producción total de pulpa.

El proceso al sulfato es un derivado del proceso a la sosa, se observó que cuando el álcali perdido en la sosa se sustituye por sulfato de sodio en lugar de hacerlo con carbonato de sodio, el sulfato se reduce a sulfuro durante la incineración del licor gastado. Por lo tanto, la expresión proceso al sulfato es errónea, ya que se supone que el sulfato es el agente activo de cocción, aunque en realidad los activos son el hidróxido de sodio y el sulfuro de sodio. El nombre kraft se ha aplicado a este proceso porque las pulpas producidas son sumamente resistentes, sobre todo cuando la cocción termina mientras el contenido de lignina conserva todavía un nivel relativamente elevado. Inicialmente, se utilizó la palabra kraft únicamente para las pulpas sin blanquear que se utilizan en la producción de papeles muy resistente; la denominación "al sulfato" se utilizó para los grados blanqueables de pulpa. Actualmente las dos expresiones se utilizan en forma indistinta. El proceso kraft es superior al proceso a la sosa en relación con:

- La velocidad de la pulpa
- El rendimiento de la pulpa
- La calidad
- Los costos de producción

- El predominio en la industria alcalina de producción de pulpa.

El proceso kraft también ofrece varias ventajas con relación al proceso al sulfito, entre las cuales se encuentran:

- Puede utilizarse cualquier especie de madera, lo que da una gran flexibilidad al suministro de madera.
- En las astillas puede tolerarse una cantidad relativamente grande de corteza.
- Los tiempos de cocción son breves.
- El problema del alquitrán tiene menor importancia.
- La pulpa tiene una resistencia excelente.
- El proceso de recuperación del licor gastado se conoce bien.
- Se logran productos secundarios valiosos como la trementina.

Casi cualquier especie de madera puede convertirse en pulpa por el proceso al sulfato o kraft, el cual puede considerarse prácticamente como un proceso universal de obtención de pulpas, este proceso se utiliza con éxito para convertir en pulpa casi cualquier madera que contenga fibras de suficiente longitud para fines de fabricación de papel, por mucho años esta pulpa se consideró no blanqueable, sin embargo los conocimientos actuales permiten blanquearla casi a cualquier grado de modo que se puede utilizar prácticamente en cualquier tipo de papel. El establecimiento de este proceso ha tenido como resultado lo que puede ser considerado como una revolución en la fabricación de pulpa de madera, probablemente ha tenido mayor influencia sobre el crecimiento de la industria moderna que cualquier otro factor individual en el desarrollo y progreso de la industria. Por este y otros motivos mencionados con anterioridad se eligió el proceso kraft para desarrollarlo en el aspecto de contaminación y control de sus aguas. A continuación se describirá con detalle cada una de las etapas que se siguen.

### **Preparación de la Madera.**

Las materias primas son los troncos de maderas, astillas y lampazos (residuos de rollos aserrables) procedentes de aserraderos. Los troncos de maderas son cargados en los descortezadores, que son especies de tambores que funcionan rotando a una velocidad de 6 a 10 revoluciones por minuto. Este movimiento produce el choque entre si de los

troncos y como resultado de esto la corteza se desprende, esta etapa del proceso tarda entre 15 y 25 minutos, dependiendo del tipo de madera.

La corteza desprendida se recolecta mediante bandas transportadoras ubicadas bajo los descortezadores, que la transporta hasta la cámara de combustión de las calderas de poder. La proporción de cortezas en los troncos varía entre 6 y 25% en volumen, dependiendo del tipo de madera y del diámetro de los troncos.

Tanto los troncos descortezados como los lampazos procedentes de aserraderos, son astillados en equipos conocidos como chipeadores. Estos equipos consisten en un disco rotatorio provisto de una hilera de cuchillas, los que al entrar en contacto con los troncos los trituran convirtiéndolos en astillas. El proceso de astillado es crucial en el control de pérdidas de maderas (finos y astillas subdimensionadas). El cambio de cuchillas se debe realizar una vez en cada turno.

Posteriormente las astillas procedentes del chipeador y aquellas procedentes de aserraderos son clasificadas en equipos llamados harrereros, cuya función consiste en rechazar las astillas con sobre-tamaño para ser devueltos al chipeador, y eliminar los finos y astillas subdimensionadas, las cuales se usan como combustibles en la caldera. En el proceso kraft, el licor de cocción (licor blanco) penetra dentro de la astillas en todas las direcciones, por lo que es muy importante mantener un rango aceptable de espesor de la astilla de entre 3 y 4 mm, sin embargo, en la práctica hasta 7-8 mm son aceptables. Espesores menores de 2-3 mm generan una sobre-cocción de la madera, debilitando la resistencia de la fibra, y un sobre-espesor genera una cocción incompleta produciéndose los nudos.

Una vez clasificadas las astillas, son depositadas en unas tinas de acopio cuya función consiste en homogenizar las mezclas de astillas de diferentes fuentes. La homogenización de las astillas que finalmente se destinan a la cocción es importante, ya que de ella dependen las propiedades finales de la celulosa. El control de la variabilidad en la densidad básica ( $\text{Kg/m}^3$ ) de la mezcla al digestor es la función principal de la tina de acopio.

### Etapa de Cocción.

Las astillas procedentes de la tina de acopio son conducidas hacia la tolva de astillas, donde se impregna con vapor de agua para eliminar su contenido de aire. Posteriormente entran en un vaso impregnador de alta presión, es en esta etapa donde comienza a agregarse el licor blanco a las astillas, esta mezcla finalmente entra en el digestor continuo. El digestor continuo es como una gran olla a presión con forma de cilindro, dentro de la cual las astillas son sometidas a cocción con el licor blanco a altas temperaturas y presiones. La función de la cocción consiste en liberar las fibras de celulosas contenidas en las astillas, mediante la disolución de la lignina que las mantiene unidas. El rango de temperatura de cocción varía entre 130-170°C, siendo más alta en la etapa inicial (parte superior del digestor).

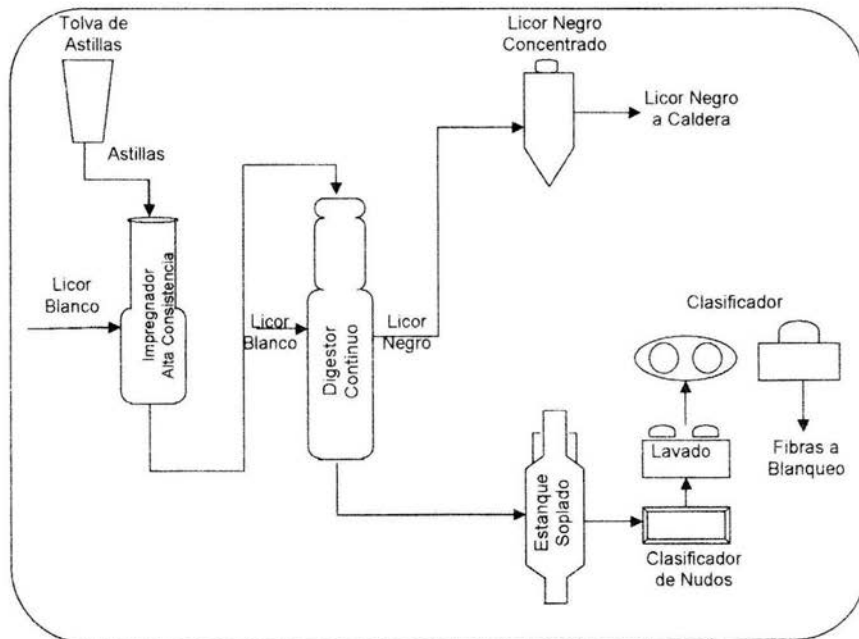


Fig. 2.2 Etapa de cocción del proceso Kraft.

Continuamente a través de sus diversas secciones, se agregan y se retiran líquidos de cocción, y en la medida que la mezcla de astillas va descendiendo dentro del cilindro, se transforma lentamente en una pasta compuesta por fibras de celulosas, lignina y licor de

coCCIÓN, mientras que una parte importante de la lignina se retira disuelta en los líquidos en forma de licor negro (mezcla de licor blanco y lignina disuelta).

La pasta posteriormente sigue una etapa de lavado a altas temperaturas dentro del digestor, en el cual flujos a contracorriente de agua van eliminando el licor negro de la pasta. Finalmente, la pasta pasa por un estanque de soplado, cuya función es reducir bruscamente la presión dentro del digestor con el objeto de soltar las fibras aún compactas. El proceso de soplado se realiza a menores temperaturas, razón por la cual se inyecta agua fría a la pasta para bajar la temperatura al rango de 75-80°C. Más tarde la pasta sigue varias etapas de lavado para eliminar el resto de licor negro, luego pasa al clasificador de nudos (astillas que no alcanzaron una coCCIÓN completa). Los nudos son devueltos al digestor continuo y las fibras clasificadas pasan sucesivamente etapas de clasificación y lavado, obteniéndose finalmente la celulosa kraft sin blanquear (pasta café) que posee todavía altos niveles de lignina. Esta etapa del proceso se muestra en la figura No. 2.2 anteriormente ilustrada.

#### **Etapa de Blanqueo ECF.**

La pasta clasificada y lavada, prosigue a varias etapas de blanqueo en las cuales se utilizan diferentes productos químicos, tales como el dióxido de cloro, oxígeno, peróxido y soda cáustica. Estas etapas de blanqueo buscan eliminar el remanente de lignina contenida en la pasta, proceso ya iniciado en la etapa de coCCIÓN, sin producir un deterioro en la resistencia de las fibras. El proceso de blanqueo significa necesariamente una pérdida de rendimiento, por que se elimina una parte importante de la lignina que aún permanece en la pasta café y, además, una parte de las fibras de celulosa se degradan como consecuencia de los agentes químicos de blanqueo. Normalmente en todos los procesos para blanquear se pierde entre un 5-9% de la pasta café, para alcanzar blancura de 87-90%.

Las plantas de celulosa más modernas cuentan en esta etapa con un proceso adicional de designificación con oxígeno, el cual consiste en aplicar altas dosis de oxígeno a la pasta café para producir la oxidación de la lignina, previo a las etapas de blanqueo, con este paso se logra reducir sustancialmente el consumo de químicos de blanqueo.

Las principales etapas de blanqueo y los símbolos que los representan son:

**C:** Cl<sub>2</sub>, al combinarse con la lignina, forma los compuestos clorados que son posteriormente solubles en agua.

**E:** Extracción con sosa cáustica (NaOH), convierte los compuestos clorados en sustancias solubles. Esta etapa se acompaña a veces con químicos como el oxígeno y/o peróxido de oxígeno, en este caso esta etapa se representa como Eo/Eop.

**D:** Dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>). Su acción es similar al Cl<sub>2</sub>, pero su efecto sobre las fibras es menos dañino, y desde el punto de vista ambiental genera menos residuos, esto es, 1Kg de ClO<sub>2</sub> equivale en poder oxidante a 2.63 Kg de Cl<sub>2</sub>.

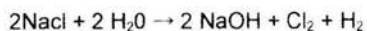
**H:** Hipoclorito de sodio y calcio NaClO y Ca(ClO)<sub>2</sub>. Actualmente su uso está siendo erradicado de los procesos de blanqueo debido a la formación de cloroformo y su bajo poder oxidante.

**O:** Oxígeno gaseoso (O<sub>2</sub>). Es usado tanto en la etapa de deslignificación como para reforzar la etapa E de extracción, su poder oxidante es 4.4 veces el del cloro (Cl<sub>2</sub>).

**P:** Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Se usa como una etapa adicional de blanqueo o para reforzar la etapa E de extracción.

Fuera de estas etapas, algunas plantas usan en sus procesos de blanqueo agentes quelantes (Q) para inhibir algunas reacciones químicas indeseadas, enzimas (X) para etapa de bioblanqueo y ozono (Z).

Los principales químicos de blanqueo son generados internamente dentro de las plantas, así el cloro y la sosa cáustica se genera a partir de la sal en la siguiente reacción:



El dióxido de cloro se produce generalmente dentro de la planta, debido a su carácter explosivo. Su obtención se produce mediante reducción del clorato de sodio (NaClO<sub>3</sub>), el cual puede ser comprado externamente o generado internamente mediante electrólisis de la sal (NaCl).

El hipoclorito de sodio (NaClO) puede ser generado internamente mediante una reacción de sosa cáustica (NaOH) con gas cloro (Cl<sub>2</sub>).

A través de los avances recientes, los niveles de residuos en los efluentes líquidos de las plantas de celulosas han bajado continuamente. El proceso de blanqueo **ECF** (Elemental Chlorine Free) basado en dióxido de cloro, se ha impuesto largamente en la industria de la celulosa como el más aceptado, en reemplazo de las antiguas plantas de blanqueo basados en cloro elemental.

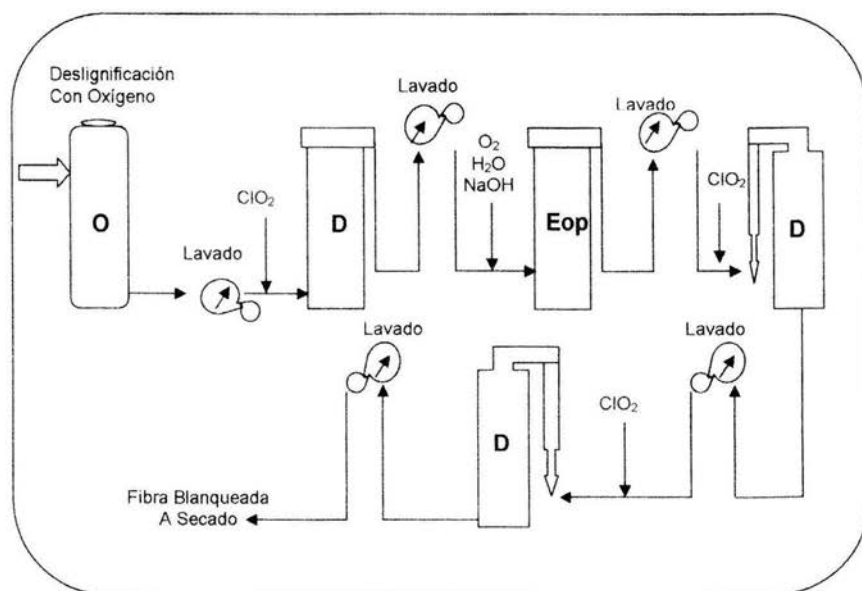


Fig. 2.3 Etapa de blanqueo del proceso Kraft

El residuo líquido procedente de la planta de blanqueo es conducido a la planta de tratamiento primario para su neutralización y filtrado antes de devolverlo a los ríos. La pasta resultante, prácticamente libre de lignina, puede ser secada para obtener la celulosa blanca kraft. En la figura 2.3 se resumen las principales etapas de blanqueo ECF, ODE o PDD. Los tratamientos para las aguas residuales de esta etapa y del todo el proceso Kraft, se describirán en el siguiente capítulo.

### Secado y Embalado.

La pasta procedente de la planta de blanqueo es preparada para su secado. La consistencia (porcentaje de fibras contenidas en la pasta) inicial, a la entrada de la máquina secadora, es de aproximadamente de 1-2 %. Desde la caja de entrada, la pasta



es distribuida uniformemente sobre el fourdrinier. Una vez en la tela, accionada por varios rodillos, se procede a extraer el exceso de agua.

Ya en la fourdrinier, comienzan a producirse las primeras uniones entre las fibras para formar una hoja, ésta pasa luego por prensas de succión y de rodillos, donde se le extrae gran cantidad de agua.

La hoja, que a esta altura posee una consistencia de aproximadamente un 46%, entra a los preseca-dotes, son grandes cilindros en cuyo interior circula vapor a altas temperaturas. Luego pasa a los secadores principales, en cuyo interior existen diversos rodillos calientes que conducen la hoja a través de calentadores por convección y radiadores infrarrojos. A la salida de esta área, la hoja posee una consistencia de 87-92% en seco.

Finalmente la hoja pasa por la cortadora, dejándola en forma de pliegos, los que se apilan en montones, se prensan para que ocupen menos volumen reduciendo el costo de fletes, se embalan en forma de units y se pesan antes de guardarlos en las bodegas. También existe la posibilidad de enrollar la hoja de celulosa sin usar la cortadora, formándose las bobinas.

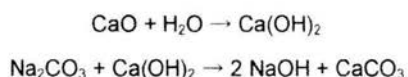
### **Sistema de Recuperación y Energía.**

Las cortezas recuperadas en los descortezadores, los aserrines y astillas subdimensionadas son transportadas mediante correas y usadas como combustibles en las calderas de poder para generar vapor.

El licor negro a la salida del digestor continuo está compuesto principalmente de material orgánico disuelto (lignina) y sales residuales del licor blanco, generalmente con una concentración de 15-18 % de sólidos, ésta sigue un proceso de concentración mediante evaporadores de múltiples efectos. El proceso de concentrado consiste en flujos de vapor aplicados en contracorriente con el licor negro, bajo diferentes condiciones de temperatura y presión en cada una de las etapas. Además de extraer el agua del licor negro, en los evaporadores se retira en forma de gases algunos compuestos de metanol, tall oil y trementina, los cuales posteriormente son condensados, tratados y recuperados para su posterior uso y comercialización (se usan para producir aromas, jabones,

diluyentes y alimentos). Una vez concentrado el licor negro, entra a la caldera recuperadora a una consistencia de entre 60 y 70 %, se quema la parte orgánica produciendo la energía necesaria para generar el vapor, y las cenizas se recuperan para producir más tarde el licor verde.

El licor verde es básicamente la ceniza resultante de la combustión del licor negro cuyos principales compuestos químicos son sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) y carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) mezclado con agua, el cual debe caustificarse agregándole los químicos necesarios para generar el licor blanco. El principal químico que se agrega al licor verde es la cal viva ( $\text{CaO}$ ), la cual es producida en los hornos de cal, donde se quema la cal apagada o caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) retirándole el  $\text{CO}_2$ . Las principales reacciones químicas del proceso de caustificación son las siguientes:



El proceso de caustificación es lento, generalmente toma entre 3 y 4 horas. El licor blanco producido se filtra para retirar los compuestos no disueltos, formándose los lodos de ( $\text{CaCO}_3$ ). La solución blanca resultante, principalmente compuesta por sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ) y sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), se almacena en un estanque especialmente acondicionado para su uso posterior como licor blanco en la cocción. A los lodos generados se les extrae la humedad excedente y se vuelven a quemar en los hornos de cal junto a la caliza.

El vapor generado en la caldera recuperadora y de poder pasa primero por un tubo generador, en el cual se genera energía eléctrica para los procesos de la planta. En la actualidad, las plantas de celulosa más modernas son generadoras de excedentes de energía eléctrica.

# CAPITULO III

### 3.1 Tratamiento de Aguas.

---

Desde 1960, la contaminación del agua se ha convertido en un problema de gran importancia en la industria. En muchos casos, el riesgo de una crisis ecológica, ha convertido a la contaminación del agua en un problema más emocional, político que técnico. El criterio común de un uso "razonable" del agua ha sido reemplazado por estándares de calidad del agua, y la contaminación de la misma se define en términos de no sobrepasar ciertos límites en el agua receptora del efluente. También se define ya en base al concepto de que los propios efluentes de las fábricas no excedan determinados límites. Las industrias de transformación requieren agua para una gran variedad de propósitos. Cuando se estudia la localización de una nueva planta o la ampliación de una ya existente, es necesario estudiar sus necesidades de agua y lograr la mayor economía en el uso de los suministros disponibles.

Entre todos los problemas creados por el uso industrial del agua, el de su contaminación es el más difícil y donde el control tiene mayor costo. La tendencia del control de la contaminación se ha centralizado en el establecimiento de estándares uniformes para los efluentes industriales. Esto significa que el concepto de dilución y la capacidad de "autopurificación" de la corriente receptora del efluente no son parámetros adecuados para determinar el tratamiento necesario que elimine la contaminación. En la actualidad todas las emisiones de aguas contaminantes de la industria, deberán ser tratadas, este tratamiento permitirá el mayor aprovisionamiento del agua, ya sea para necesidades domésticas, industriales o de riego. Con los tratamientos se pretende disminuir, controlar o eliminar aquellos elementos que alteran las condiciones originales del agua, y con ello evitar el desperdicio o tenerlas que extraer o traer nuevamente para ser utilizados en el hogar o la industria.

Cualquier actividad industrial produce un impacto sobre el medio ambiente, que debe ser minimizado para hacer compatible el desarrollo económico con la conservación de la naturaleza. Las aguas residuales son generadas por actividades humanas y sólo se tratan parte de ellas, para eliminarles los componentes considerados peligrosos y para reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) antes de ser arrojadas a los efluentes. Sin embargo, en México el 17% de los tratamientos no opera, el 80% trabaja al 60 u 80% de

su capacidad, y sólo el 3% cumple su meta, además sólo se trata el 17.5% del total de las aguas residuales generadas de las cuales sólo el 1% se reusa,<sup>(4)</sup> lo que hace que el problema de la generación de las aguas residuales aumente a medida que crece la población, la industria y las demás actividades humanas.

La depuración consiste en la eliminación de la contaminación e impurezas incorporables en el agua a tratar. Los procesos utilizables para la depuración de las aguas dependen del tipo de afluente, los cuales se pueden clasificar en:

**Procesos Físicos:** Son todos aquellos en los que se emplean las fuerzas físicas para el tratamiento, dependen esencialmente de las propiedades físicas de la impureza, como tamaño de partícula, peso específico, viscosidad, etc. En general, las operaciones físicas se emplean durante todo el proceso de tratamiento de aguas residuales, aunque algunas son casi exclusivamente operaciones de pretratamiento (desbaste, dilaceración y homogenización de caudales, mezclado, floculación, sedimentación, flotación y filtración). El hecho de utilizar uno o varios de los procesos descritos dependerá del agua residual que tengamos que tratar.

**Procesos Químicos:** Son todos aquellos procesos en los que la eliminación de los contaminantes del agua residual se lleva a cabo mediante la adición de reactivos químicos o bien mediante las propiedades químicas de diversos compuestos. Los procesos químicos (precipitación química, transferencia de gases, adsorción, neutralización, oxidación química, desinfección, cloración, eliminación de sustancias inorgánicas disueltas) se utilizan en la depuración de las aguas junto a operaciones físicas y procesos biológicos.

**Procesos Biológicos:** El tratamiento biológico de las aguas residuales se puede realizar en todo tipo de aguas y es generalmente un tratamiento secundario, utiliza reacciones bioquímicas para quitar las impurezas y tiene como misión la estabilización de la materia orgánica. Se consigue biológicamente utilizando una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. En el tratamiento biológico el proceso consiste únicamente en transformar los nutrientes en tejido celular y diversos gases. Los procesos biológicos aerobios incluyen filtrado biológico y los lodos activados. Los procesos de oxidación

---

<sup>(4)</sup> [www.kurita.com.mx](http://www.kurita.com.mx)

anaerobia se usan para la estabilización de lodos orgánicos y desechos orgánicos de alta concentración.

En el mejor de los casos ciertas industrias cuentan con plantas de pretratamiento dentro de sus instalaciones con el fin de retirar sólidos, grasas y aceite, material flotante, sólidos disueltos, controlar un pH extremo o altas temperaturas antes de verterlas en el drenaje, existen tres tipos de tratamientos los cuales se citan a continuación.

**Tratamiento primario de las aguas residuales**, estos tratamientos preparan las aguas residuales para su tratamiento biológico, eliminando ciertos contaminantes tales como materiales suspendidos, flotantes (trapos, bolsas, troncos, etc.) y sedimentables además reducen las variaciones de caudal y concentración de las aguas, esto se logra a través de diferentes equipos en combinación con la fuerza de gravedad, algunas de las operaciones unitarias que intervienen son: Cribado, tamizado, desmenuzado, desarenado, sedimentación, filtración, flotación, etc. Una vez que se han eliminado los desechos se les realiza las pruebas CRETIB (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable, Biológico/Infeccioso), en caso de no dar positivo en alguna de ellas, se disponen en algún relleno sanitario.

**Tratamiento secundario de las aguas residuales**. Entre las operaciones que se utilizan en el tratamiento secundario de las aguas contaminadas están: el proceso de lodos activados, la aireación u oxidación total, el tratamiento anaeróbico. El tratamiento secundario de aguas residuales es un proceso biológico que utiliza bacterias aerobias como un primer paso para remover hasta cerca del 90 % de los desechos biodegradables que requieren oxígeno. Después de la sedimentación, el agua pasa a un tanque de aireación en donde se lleva a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica y posteriormente pasa a un segundo tanque de sedimentación, de ahí al tanque de desinfección por cloro y después se descarga para su reutilización.

El tratamiento secundario más común para el tratamiento de aguas residuales es el de los lodos activados, las aguas que provienen del tratamiento primario pasan a un tanque de aireación en donde se hace burbujear aire o en algunos casos oxígeno, desde el fondo del tanque para favorecer el rápido crecimiento de las bacterias y otros microorganismos. Otras plantas de tratamiento de aguas utilizan un dispositivo llamado filtro percolador en lugar del proceso de lodos activados. En este método, las aguas a las

que les han sido eliminados los sólidos grandes, son rociadas sobre un lecho de piedras de aproximadamente 1.80 metros de profundidad. A medida que el agua se filtra entre las piedras entra en contacto con las bacterias que descomponen a los contaminantes orgánicos.

**Tratamiento terciario de las aguas residuales.** Entre las operaciones que se utilizan en el tratamiento terciario de aguas contaminadas están: la microfiltración, la coagulación y precipitación, la adsorción por carbón activado, el intercambio iónico, la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la remoción de nutrientes, la cloración y la ozonización. A cualquier tratamiento de las aguas residuales que se realiza después de la etapa secundaria se le llama tratamiento terciario y en este, se busca eliminar los remanentes de los contaminantes orgánicos, los nutrientes como los iones fosfato y nitrato o cualquier exceso de sales minerales. En el tratamiento terciario de aguas residuales se pretende que el agua tratada sea lo más pura posible antes de ser arrojadas al medio ambiente. Dentro del tratamiento de las aguas de desecho para la eliminarles los nutrientes están la precipitación, la sedimentación y la filtración. Actualmente se aplican muy pocos tratamientos terciarios a las aguas residuales.

### 3.2 El agua para la fabricación del papel.

---

#### **Características del agua**

Todas las fabricas tienen algún método de purificar sus suministros de agua, excepto las que compran el agua tratada, las que tienen un suministro excepcional de agua subterránea y las que pueden usar agua cruda porque hacen un producto que no requieren agua tratada, en donde se necesita agua tratada las características objetables del agua se eliminan por alguno de los siguientes procesos:

- Sedimentación.
- Coagulación.
- Filtración.
- Algunas combinaciones de los anteriores.

Cuando se usa para alimentación de calderas, el agua debe de estar libre de materia suspendida y también debe de estar blanda, aún cuando este blanda, en las calderas se puede formar una cierta cantidad de incrustaciones, arrastre de agua, corrosión, etc., se generan muchos problemas relacionados con el agua en la planta de pulpa, entre estos esta la contaminación del condensado de vapor, la formación de espuma inducida por la naturaleza tensoactiva por parte de la materia orgánica extraída de la madera. Generalmente se requieren de agentes químicos para controlar la espuma en los tamices y lavadores a fin de mantener la capacidad de producción. Un problema más difícil de controlar es la producción de incrustaciones en los evaporadores, donde el aumento gradual en la concentración de sólidos tanto inorgánicos como orgánicos hace que se excedan los límites de solubilidad del sulfato de calcio y otros materiales, por estos y otros motivos más, se establecen las consideraciones que se deben de tener con el agua de proceso para la fabricación de pulpa y papel.

**Materia en suspensión:** La materia en suspensión consiste de partículas insolubles, asentables o no asentables, tales como fango, materia orgánica o plancton, y ocasionan problemas en la fabricación de pulpa o papel. El material arenoso, abrasivo, puede causar dificultades al equipo o producir "agujeros de alfiles" en el papel. Las partículas de origen



vegetal pueden ocluir los fieltros y las telas mecánicas, cambiar el tono o disminuir la blancura de la pulpa o papel y causar manchas u otros defectos en el producto terminado. La formación de espumas en las calderas también ha sido atribuida al material suspendido.

La materia en suspensión se puede separar por sedimentación, coagulación o floculación y filtración. Dicha separación es necesaria porque las aguas superficiales siempre contienen ciertos materiales en suspensión que provienen de las corrientes o de los lagos y también pueden contener materiales suspendidos provenientes de desechos municipales e industriales.

Turbidez: La turbidez en el agua es ocasionada por partículas en suspensión o coloidales, finamente divididas, tales como arcillas, fango y microorganismos. Un agua puede ser de color oscuro pero no turbia; por consiguiente, la turbidez y el color no se deben confundir. La turbidez no tiene equivalente químico; sin embargo, como un medio de expresar los resultados, se reporta en NTU (Unidades de Turbidez Nefelométricas), la unidad de turbiedad fue definida como "la obstrucción óptica de la luz, causada por una parte por millón de sílice en agua destilada", 1 unidad nefelométrica de turbiedad (NTU)=7.5ppm de SiO<sub>2</sub>, o bien 1 unidad nefelométrica de turbidez= 1ppm de formazina estándar.<sup>(5)</sup> El agua turbia no es deseable para la alimentación de las calderas, porque las partículas en suspensión pueden asentarse por efecto de la concentración y, posiblemente, depositar incrustaciones o causa condiciones que favorezcan la formación de espuma. La turbidez puede afectar adversamente la blancura y el color de los papeles blancos o teñidos. La turbidez puede eliminarse por floculación y filtración.

Dureza: Cualesquiera sales disueltas que tengan poder destructivo hacia el jabón, causan dureza; las sales de calcio y magnesio son las más comunes, aunque el hierro, aluminio y los ácidos libres también causan dureza. La mayoría de las aguas contienen cierto grado de dureza tanto de carbonatos como de no carbonatos. En los análisis de agua, la dureza se reporta como la cantidad de carbonato de calcio que es equivalente a todas las sales de calcio y magnesio. La dureza de carbonatos, también llamada temporal, es la que se debe a los bicarbonatos de calcio y magnesio. La dureza de no carbonatos, también

---

<sup>(5)</sup> [www.avantel.net/~arbolag/turbi.htm](http://www.avantel.net/~arbolag/turbi.htm)

llamada dureza permanente, es la que se debe a los sulfatos, cloruros o nitratos de calcio o magnesio.

En el encolado del papel, las aguas duras son origen de dificultades. El agua empleada para diluir el encolante de jabón debe de ser lo más blanda posible, porque las sales de calcio y magnesio presentes en un agua dura precipitan jabones de cal y magnesia que destruyen parte del encolante en forma de flóculos y espumaderas. Los resinatos insolubles de calcio y magnesio, que no tienen valor encolante, se forman porque las sales minerales del agua dura reaccionan con el encolante. Existe la creencia de que las sales del agua afectan la condición coloidal del encolante, haciendo que la brea se aglomere en partículas grandes, reduciendo así en el encolante su poder cubriente de fibras. Frecuentemente se usan cantidades adicionales de alumbre para ayudar en el encolado; para reducir la acidez total a menudo se usa aluminato de sodio con el alumbre. La ventaja de usar un exceso de alumbre consiste en la conversión que se produce de los carbonatos de calcio y magnesio en sus sulfatos, los cuales son menos perjudiciales en el encolado. Se supone que el encolante de brea por acción selectiva precipita con alumbre más que con las sales. Como una alternativa a las dificultades de encolado con agua dura se han usado coloides protectores como la caseína y la cola.

Existen muchos lugares, como las pilas, tanques, tuberías, y tanques de vacío, en los que el uso del agua dura da lugar a la formación de incrustaciones, algunas veces las incrustaciones se desprenden y causan problemas en los procesos de fabricación de pulpa y papel. Si la incrustación se forma sobre la tela metálica de la máquina fourdrinier o de la de cilindros, habrá dificultades en la formación de la hoja y la vida de la tela se reducirá debido a la acción de la incrustación y a las propiedades corrosivas de los ácidos o medios mecánicos utilizados para removerla.

Color: El agua transparente-cristal es la más deseable para los procesos de manufactura porque las aguas muy coloreadas pueden afectar adversamente a las pulpas y a los papeles, tanto blancos como teñidos. Las fibras celulósicas absorben rápidamente las sustancias coloreadas y el tinte adquirido puede persistir hasta el producto terminado. El color del agua generalmente se debe a la materia orgánica o a sales de hierro. Los compuestos orgánicos y de hierro son difíciles de separar de las fibras. El color puede ser eficientemente eliminado del agua mediante métodos de coagulación química y filtración.

El efecto perjudicial del agua con un alto contenido de materia orgánica puede también deberse a organismos vivos. Las bacterias formadoras de babazas son la causa de las manchas lamosas de los "agujeros de alfiler" en algunos casos, y de otros resultados indeseables. La unidad para medición del color que se usa como estándar, es el color que produce un mg/l de platino, en la forma de cloro-platinado, la relación de cobalto-platino se puede variar para igualar el matiz. El color del agua usualmente se expresa en unidades de color en la escala platino-cobalto.

Hierro: El hierro en el agua de proceso origina el manchado de la pulpa y del papel. En aguas superficiales, el hierro está casi siempre presente como óxido férrico hidratado y dispersado coloidalmente, aunque puede estar presente tanto en condición ferrosa como férrica. La celulosa adsorberá hierro de las soluciones diluidas y la adsorción del hierro mancha la pulpa o el papel blanco y opaca a los papeles coloreados. El hierro puede ser grandemente disminuido en el agua por aeración y filtración.

Manganeso: El manganeso es igualmente perjudicial a la pulpa y al papel porque su presencia en el agua manchará las fibras. Se recomienda que haya la menor cantidad posible de manganeso. La oxidación del manganeso es lenta, y el óxido es negro. En las operaciones de blanqueo el manganeso del agua se oxidará a permanganato y dará un color rosado. Los depósitos de óxido negro pueden obstruir las tuberías y formarse sobre las superficies de los tanques y demás equipos con los que el agua entra en contacto. El manganeso puede eliminarse con métodos similares a los del hierro y, usualmente, tanto el uno como el otro se eliminan en forma simultánea.

Bióxido de carbono y oxígeno disuelto: La presencia de bióxido de carbono libre ( $\text{CO}_2$ ), en el agua, en cantidades superiores a 25 ppm puede afectar seriamente la formación de la hoja en la máquina de papel. El bióxido de carbono es importante desde el punto de vista de la corrosión porque el valor de pH de un agua que tenga alcalinidad por bicarbonatos depende de las cantidades relativas presentes de bióxido de carbono libre y alcalinidad por bicarbonatos; y las aguas que tienen valores bajos de pH son corrosivas. El oxígeno disuelto, que se debe a la presencia de aire disuelto en el agua, es corrosivo; y la contaminación en el agua de un alto contenido de oxígeno disuelto y de un bajo valor de pH es extremadamente corrosiva. Aumentando el pH por adición de un material alcalino se logra disminuir la velocidad de corrosión y formar una película protectora en la tubería.

El bióxido de carbono libre escapa fácilmente del agua, especialmente si existe en grandes cantidades; por consiguiente, para esta determinación se debe tomar una muestra especial en el momento mismo de efectuarla.

Concentración de Iones hidrógeno: La determinación del pH del agua es una importante medición en la industria de la pulpa y del papel. El pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, siendo el pH 7 (neutro), pH superior a 7 (alcalino) y un pH inferior a 7 (ácido). El uso económico de cargas, colorantes, encolantes, etc., pueden afectarse adversamente por falta de conocimiento y de control del pH del agua. Muchos materiales son muy sensibles a los cambios de la concentración de iones de hidrógeno, y por no controlar el pH puede demeritarse la calidad del producto. En el tratamiento del agua para separar impurezas, es esencial el ajuste en la concentración de iones hidrógeno para una floculación exitosa. Actualmente en las fábricas de pulpa y papel es común el control automático del pH del agua de proceso.

Cloruros y Sulfatos: Los cloruros con frecuencia están presentes en el agua pero usualmente no afectan al agua de proceso, aunque cantidades excesivas pueden aumentar su corrosividad. Sin embargo, en tipo de papeles tales como se usan en capacitores y en impregnación plástica, los cloruros son un factor decisivo a considerar en el análisis. Por ejemplo, en los papeles dieléctricos los cloruros pueden reducir la resistencia dieléctrica. Los sulfatos están presentes en todas las aguas naturales e influyen en la formación de incrustaciones en calderas.

Silice: La silice es disuelta de las rocas por el agua y contribuye a la cementación de otras impurezas en las incrustaciones duras de calderas. En aguas que se van a utilizar en las calderas es suficiente separar el silice, hierro y aluminio, los cuales pueden ser reportados como óxido de silice ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de fierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

El agua no debe de contener impurezas en exceso de las que se establecen en la siguiente tabla No.3.1, expresadas en partes por millón y en términos de las sustancias indicadas.

| Producto                                    | Papel fino | Papel Kraft Blanqueado | Papel Kraft sin blanquear | Papeles con Pasta mecánica | Pulpas a la Sosa y al Sulfato |
|---|------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Turbidez (SiO <sub>2</sub> )                | 10         | 40                     | 100                       | 50                         | 25                            |
| Color en unidades de Pt                     | 5          | 25                     | 100                       | 30                         | 5                             |
| Dureza total CaCO <sub>3</sub>              | 100        | 100                    | 200                       | 200                        | 100                           |
| Dureza de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )       | 50         |                        | ----                      | ----                       | 50                            |
| Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )            | 75         | 75                     | 150                       | 150                        | 75                            |
| Anaranjado de metilo                        |            |                        |                           |                            |                               |
| Hierro (Fe)                                 | 0.10       | 0.2                    | 1.0                       | 0.3                        | 0.1                           |
| Manganeso (Mn)                              | 0.05       | 0.1                    | 0.5                       | 0.1                        | 0.05                          |
| Cloro residual (Cl <sub>2</sub> )           | 2.0        |                        |                           |                            |                               |
| Sílice soluble                              | 20         | 50                     | 100                       | 50                         | 20                            |
| Sólidos Totales Disueltos                   | 200        | 300                    | 500                       | 500                        | 250                           |
| Bióxido de Carbono libre (CO <sub>2</sub> ) | 10         | 10                     | 10                        | 10                         | 10                            |
| Cloruros (Cl)                               | ----       | 200                    | 200                       | 75                         | 75                            |
| Dureza de Magnesio (CaCO <sub>3</sub> )     | ----       | ----                   | ----                      | ----                       | 50                            |

Tabla No. 3.1 Especificaciones para la composición del agua de proceso.

En resumen, se puede considerar que si bien las aguas de alimentación pueden introducir compuestos específicos que actúan como contaminantes, tales como ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, etc., su principal contribución a la contaminación de las aguas de proceso se debe a los iones inorgánicos como sodio, calcio, magnesio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos.

### 3.2.1 Cantidad de agua utilizada en los procesos para la obtención de la pulpa.

La manufactura de la pulpa y del papel requiere grandes volúmenes de agua. Desde sus inicios, la industria se ha localizado casi exclusivamente a lo largo de los ríos más importantes. En las primeras plantas, se usaba el agua no sólo para hacer pulpa y papel, sino también para generar energía hidráulica al represar la corriente y producir la carga necesaria para accionar las ruedas hidráulicas que operaban las piedras del molino donde se convertía la madera en pulpa. Muchas plantas modernas se localizan en el mismo lugar que ocupaban estas primeras plantas y continúan usando energía hidráulica en la operación de molinos o de turbinas hidroeléctricas. El agua

requerida por una planta moderna de pulpas y papel varía considerablemente de acuerdo a las siguientes variables:

- Según el proceso de preparación de pulpa.
- La disponibilidad de agua.
- La secuencia de blanqueo, y
- Las restricciones para la descarga del agua de desecho.

La industria de la pulpa y papel es una gran consumidora de agua debido a que la pulpa es lavada con ella en varios puntos dentro del proceso y a que el agua se usa para transportar las fibras de pulpa desde su producción inicial en la planta de pulpa, a través de varias operaciones de refinación y finalmente a las máquinas de papel donde puede introducirse al alambre de formación a una concentración de lechada que es 99% agua y sólo 1% fibra (llamada del 1% de consistencia en la terminología de las plantas de papel). Mientras que en las plantas más antiguas se llegaba a usar hasta 50 000 gal/ton de producto terminado de papel, las plantas modernas han cerrado sus sistemas para reducir la cantidad de agua requerida y, por lo tanto, reducir también el volumen de desechos a tratar.

| <b>Proceso de Manufactura de Pulpa</b> | <b>Típico (gal/ton)</b> | <b>Plantas Nuevas (gal/ton)</b> |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Kraft sin blanquear                    | 15 000 – 40 000         | 20 000                          |
| Blanqueado de Kraft                    | 15 000 – 35 000         | 20 000                          |
| Sulfito sin blanquear                  | 15 000 – 50 000         | 25 000                          |
| Blanqueado de sulfito                  | 30 000 – 50 000         | 40 000                          |
| Semiquímico                            | 8 000 – 40 000          | 10 000                          |
| Destinado                              | 20 000 – 35 000         | 25 000                          |
| Madera molida                          | 3 000 – 48 000          | 4 000                           |
| Pulpa de sosa                          | 60 000 – 80 000         | 65 000                          |
| <b>Manufactura de Papel</b>            |                         |                                 |
| Papel fino                             | 8 000 – 40 000          | 10 000                          |
| Grado para libros o publicaciones      | 10 000 – 35 000         | 12 000                          |
| Papel de seda                          | 7 000 – 45 000          | 15 000                          |
| Papeles Kraft                          | 2 000 – 10 000          | 5 000                           |
| Cartón                                 | 2 000 – 15 000          | 8 000                           |

Tabla No. 3.2 Uso de agua (flujo efluente) de la manufactura de productos de pulpa y papel

En una planta moderna de pulpa y papel sin blanquear en la que se produce cartón de revestimiento, el consumo puede ser tan bajo como de 10 000 gal/ton, y en una planta de pulpa y papel blanqueado los requerimientos pueden ser de aproximadamente 15 000 – 20 000 gal/ton. En la tabla No.3.2 se muestran los requerimientos de agua para plantas más antiguas y recientes, basados en el tipo de producción.

Conciente de lo complicado que es el proceso de elaboración del papel y del enorme gasto de agua que se puede generar, se han desarrollado programas de tratamiento químicos para procesos y para el agua que permiten la obtención de excelentes papeles y calidades de descarga conforme a la legislación ambiental actual.

### 3.3 Contaminantes presentes en el agua del proceso Kraft.

---

Las fuentes de contaminación del agua en la fabricación del papel son:

- a. Materias fibrosas.
- b. Los aditivos.
- c. Agua de alimentación.

a. Las materias primas fibrosas constituyen la fuente de contaminación principal de las aguas blancas, si bien la naturaleza e importancia de la misma varía considerablemente en función del tipo de fibra utilizada en el proceso de producción. Existen tres parámetros importantes que son:

- Contenido de partículas de finos.
- Contenido de materia orgánica soluble.
- Concentración de microorganismos.

Aunque la naturaleza química de las partículas incorporadas a las aguas de proceso por la fibra virgen y secundaria es distinta, orgánica para las primeras y/o inorgánica para las segundas, los problemas asociados con la incorporación de estos contaminantes pueden solucionarse en ambos casos mediante cambios en el tratamiento de las fibras y/o en el uso de aditivos que mejoren la retención y el drenaje en las mesas formadoras de papel. La incorporación de contaminantes solubles de naturaleza orgánica a las aguas de proceso es un problema más complejo, a diferencia de las partículas de finos, la materia disuelta y coloidal de naturaleza orgánica, no solo depende del tipo de pulpeo, sino también de la eficacia de los sistemas de lavado y/o blanqueo posteriores.

En la fibra virgen, la principal fuente de contaminación orgánica la constituyen las materias extractivas, como por ejemplo, los ácidos resinicos así como las ligninas y sus derivados. Sin embargo también pueden encontrarse contaminantes de residuos químicos utilizados en las etapas previas de pulpeo, lavado y/o banqueo, que originan compuestos contaminantes específicos, como los organoclorados, las dioxinas (se producen aproximadamente 1 mg por tonelada de pulpa), los diparabenzofenilos, etc. En realidad el



problema principal no fueron las dioxinas, sino la lignina clorada disuelta que era más persistente, lo que significaba que era bastante difícil de descomponer por las bacterias. La cantidad de sustancias orgánicas cloradas disueltas en los efluentes puede determinarse como AOX (Halogenos Orgánicos Absorbibles), es decir, la cantidad de compuestos orgánicos clorados que pueden ser absorbidos por el carbón activado. Para este tipo de proceso, el AOX fue de 3-5 Kg/ton de pulpa sobre aproximadamente 50 Kg de productos orgánicos totales liberados por tonelada.

Las pastas de fibra secundarias presentan una mayor variación en su contenido de materia orgánica soluble debido a los aditivos utilizados en el proceso de fabricación del papel. Los problemas asociados con los depósitos de materias resinosas en fibras vírgenes son reemplazados, en este caso, por un gran número de problemas asociados a los depósitos potenciales de *stickies* (sustancias pegajosas), las fuentes principales de estos contaminantes son adhesivos de contacto (polímeros de estireno-butadieno, acrilatos de vinilo, etc.) y adhesivos de fusión (por ejemplo el acetato de vinilo). Otros contaminantes son los aglutinantes que son parte de las tintas modernas, por ejemplo, las resinas alquídicas en los pigmentos de impresión láser.

Otra fuente de contaminación importante de las fibras secundarias es la elevada concentración de microorganismos como consecuencia de la suciedad y la humedad del medio en que se almacena el papel antes de su reutilización, por otra parte, los almidones presentes en el papel reciclado son un excelente medio de crecimiento para los microorganismos presentes en el sistema de aguas de proceso.

**b.** Los aditivos se consideran la segunda fuente de contaminación de las aguas de proceso, el número elevado de aditivos que se puede incorporar durante el proceso de fabricación hace difícil definir la naturaleza e importancia de esta fuente, pero aquellos que afectan en mayor medida son los siguientes:

- *Cargas:* Caolín, carbonato de calcio, talco, alúmina y silicatos.
- *Almidones:* Los almidones agregados en la parte húmeda son la fuente principal de nutrientes orgánicos para los microorganismos.
- *Agentes encolantes:* Almidones, colofonias, emulsiones de cera, AKD, ASA.

- *Agentes mejoradores de la resistencia en húmedo:* Urea-formaldehído, poliamidaepiclorohidrina, archilamida-glioxal, melamina-formaldehído, etc.
- *Agentes de destintado:* hidróxido de sodio, silicato sódico, carbonato sódico, fosfatos de sodio y potasio, surfactantes no iónicos, disolventes, polímeros dispersantes, ácidos grasos, peróxidos, etc.

Un aspecto importante a considerar en el estudio de los aditivos como fuente de contaminación son los problemas ocasionados en el proceso de fabricación, como consecuencia de las interacciones entre los aditivos y las impurezas presentes en el agua utilizada para su preparación o dilución, algunos ejemplos son:

- La formación de depósitos por reacción entre el alumbre y los compuestos responsables de la dureza del agua, con el consiguiente bloqueo de las líneas, los rociadores, las telas, los fieltros, etc.
- La hidrólisis microbiana de los almidones. La presencia de microorganismos en el agua de preparación de los almidones ocasionan problemas de slime (baba) en los sistemas de almacenamiento de estos aditivos, por lo que es necesario utilizar agua de bajo contenido bacteriano.
- La disminución de la eficacia de los procesos de encolado que utilizan sistemas basándose en alumbre/colofonias, debido a la reacción del alumbre con los compuestos responsables de la dureza del agua, en vez de con la colofonia.
- La incompatibilidad de las resinas de tipo urea-formaldehído, utilizadas para conferir mejores propiedades de resistencia en húmedo a los productos fabricados, se precipitan con aguas de carácter ácido.
- La incompatibilidad entre los diferentes agentes de encolado, los dímeros de alquiaceteno (AKD) utilizados como agentes encolantes son incompatibles cuando se mezclan con aditivos fuertemente aniónicos.
- Los agentes de encolado tipo colofonias precipitan cuando se mezclan con aditivos fuertemente aniónicos.
- Las emulsiones de ceras utilizadas como agentes de encolado poseen un elevado carácter aniónico y precipitan cuando se mezclan con aditivos altamente catiónicos.

Las consideraciones anteriores ponen de manifiesto la importancia de la adecuada dosificación de los diferentes aditivos, con el fin de evitar todas aquellas reacciones indeseadas.

c. Agua de alimentación. Los parámetros fundamentales que se consideran en las aguas de alimentación de las fábricas de papel se describieron en el apartado 3.2 de este mismo capítulo.

Si el agua se utilizase en la fábrica de papel en circuitos abiertos, el consumo de esta, sería técnica, económica y ecológicamente inadmisibles en la actualidad, por lo tanto, todas las fábricas utilizan en mayor o menor medida, algún grado de reciclado del agua en el proceso de fabricación. Las alternativas más frecuentes para la reducción del consumo de agua son:

- Reutilización de las aguas blancas como aguas de proceso.
- Reutilización del agua clarificada para diferentes aplicaciones.
- Utilización del agua para usos técnicos en sistemas cerrados.
- Reutilización del efluente después de su tratamiento como agua de alimentación.

Los problemas asociados al cierre de los circuitos de las aguas como consecuencia de la acumulación de sustancias contaminantes en las aguas de proceso son de muy diversa índole, si bien se pueden clasificar en forma general como:

- Incremento de los sólidos en suspensión.
- Incremento en la materia disuelta y coloidal.
- Incremento de la temperatura.

Incremento de los sólidos en suspensión: Los problemas asociados a este incremento son los más fáciles de resolver, ya que estos problemas pueden ser eliminados mediante sistemas de *clarificación* de las aguas de proceso. Sin embargo, una concentración elevada de los mismos puede dar lugar a graves problemas por depósitos en distintas partes del proceso de fabricación, mayor consumo de aditivos y pérdidas de propiedades físicas en el producto final, un ejemplo de esto, es el bloqueo de los rociadores en las fábricas que reutilizan el agua de proceso para esta aplicación. Con respecto al

crecimiento de los sólidos inorgánicos en suspensión, hay que considerar los efectos perjudiciales del incremento de cargas en las aguas de proceso, algunos de estos ejemplos son: incremento de los depósitos en los equipos de fabricación, incremento de la abrasión de las partes móviles, como bombas, rodillos, telas, etc., reducción de la resistencia física y química del producto, disminución de la eficacia de determinados aditivos (agentes de encolado, colorantes, etc.).

Incremento de la materia disuelta y coloidal: Estos son los que presentan una mayor importancia en la fabricación del papel, se deben principalmente al aumento de la concentración de las sales inorgánicas, de la materia orgánica y de los microorganismos. La acumulación de sales inorgánicas en el sistema es uno de los aspectos más importantes que hay que considerar como detrimento en el cierre del sistema de las aguas de proceso, debido al número elevado de problemas que pueden acarrear, tanto en el proceso de producción como en el producto. Los principales problemas asociados con el incremento de sales disueltas en las aguas de proceso son: posible disminución de la resistencia física del producto, alteración de la química de la parte húmeda de la máquina de papel por la interacción de las sales con aditivos incorporados en el proceso, disminución de la blancura en presencia de altos niveles de  $Fe^{3+}$  y  $Mn^{2+}$ , incremento en los niveles de corrosión, incremento del crecimiento microbiano como consecuencia del valor nutritivo de las sales inorgánicas, etc.

En cuanto a la materia disuelta y coloidal de naturaleza orgánica, los problemas relacionados con los distintos tipos de *pitch* (grumos de resinas), *stickies* (grumos pegajosos) y *slime biofilm* (depósitos de microorganismos), son los más importantes para los fabricantes de papel y cartón. Estos depósitos son los responsables de problemas tales como la modificación de la química de la parte húmeda o *wet-end*, la formación de depósitos en los equipos y en el producto final, corrosión, producción de malos olores, roturas en las bandas de papel, etc. En la tabla No. 3.4 se resumen las ventajas y desventajas del cierre del sistema de agua.

El nivel de acumulación está claramente relacionado con el grado de cierre. Cuanta más agua es recirculada al proceso, mayor cantidad de materiales pueden ser detectados en los circuitos.

Cualquier paso hacia el cierre de cualquier circuito de agua, es cuestión de regulación, este balance existe entre la acumulación de contaminantes y su impacto en el funcionamiento y la marcha de la máquina de papel. En la práctica existe un nivel de contaminación en los circuitos de agua, que es aceptable para cada máquina, sin causar desperfectos inaceptables, cuando este nivel de contaminantes ha sido excedido, es detectado como un mal funcionamiento y debe aplicarse algún procedimiento adicional para tratar el agua, a fin de alcanzar nuevamente, un nivel aceptable y disminuir el grado de contaminación.

En una industria papelera, el 85% de la contaminación en DQO (Demanda Química de Oxígeno) de los efluentes proviene de la fibra de papel que se "escapa" del proceso, o sea que es un caso típico donde el efluente esta compuesto en su gran mayoría por la materia prima de la fábrica.

| <b>Ventajas</b>                             | <b>Desventajas</b>                                       |
|---|--|
| <b>Aumento de los sólidos en suspensión</b> |  |
| Menor producción de lodos                   | Bloqueo de tuberías y rociadores                         |
| Menor pérdida de materias primas            | Manchas en el producto                                   |
|   | Formación de depósitos                                   |
|   | Abrasión   |
|   | Reducción de la vida de la tela                          |
|   | Aumento de finos   |
|   | Modificación de la capacidad de drenaje                  |
| <b>Aumento de los sólidos disueltos</b>     |  |
| Mayor retención de la materia disuelta      | Incrustaciones   |
|   | Formación de depósitos y grumos                          |
|   | Incremento de la actividad microbiológica                |
|   | Corrosión  |
|   | Color  |
|   | Desequilibrio de la química del wet-end                  |
| <b>Aumento de la temperatura</b>            |  |
| Mejora de los procesos de drenaje           | Problemas de encolado                                    |
| Menor consumo energético                    | Reducción de la capacidad de las bombas de vacío         |
|   | Incremento y/o alteración de la actividad microbiológica |

Tabla No. 3.3 Consecuencias de los circuitos cerrados del sistema de aguas.

### 3.4 Recirculación del agua en la fabricación del papel.

---

La cantidad y calidad del agua disponible para satisfacer la demanda actual y futura, son consideraciones muy importantes en la selección del sitio de la fabrica, tanto las facilidades de transporte de materias primas y productos terminados. Al estar seleccionando el sitio de la fabrica también debe de estudiarse el método de eliminación del agua de desecho porque cuando menos el 90% del agua que entra a la planta la abandona, ya sea como fuente de algún subproducto de enzimas y productos químicos, como vapor o como fuente de desechos al drenaje y luego hacia la corriente principal. El agua usada que lleva desechos constituye, en general, el mayor volumen y debe ser eliminada de conformidad con la legislación local o federal sobre el control de contaminantes en las corrientes.

La reutilización del agua esta íntimamente asociado con el problema del suministro de esta, algunas fábricas iniciaron hace tiempo programas efectivos de reutilización del agua debido a los grandes volúmenes requeridos. El criterio general ha sido: "¿Cuánto cuesta tratar y eliminar las impurezas orgánicas, y recircular el agua blanca; y que se ganara con respecto al uso del agua fresca?". La mayoría de las fábricas ha respondido a esta pregunta cerrando sus sistemas de agua hasta el punto que han considerado que la pérdida de fibras o productos químicos valiosos es mínima e insignificante, y que el tratamiento y recirculación adicionales de agua blanca les resultaría más costoso que el valor de los materiales recuperados. Mediante el uso juicioso del agua blanca pueden obtenerse grandes ahorros no solo en agua, fibra y materiales complementarios de la pasta de papel, sino también en la conservación de calor. Otro factor en la reutilización de agua es la exigencia de las autoridades respectivas para reducir la contaminación de las corrientes en los efluentes de las fábricas.

#### Reutilización del Agua en la fábrica de papel.

Es conocido que la reutilización de agua blanca en las fábricas de papel es de una gran importancia económica. Las exigencias de las autoridades en el mejoramiento de corrientes han provocado una mayor ciclización en las máquinas con el objetivo de reducir la carga de contaminación, y efectuando a menudo un ahorro sustancial de materiales empleados en la fabricación del papel. Mientras algunas fabricas usan hasta 25 000 gal

(95 m<sup>3</sup>) de agua fresca por cada tonelada de papel producido, existen otras que utilizan menos 5 000 gal (19 m<sup>3</sup>) por tonelada, estas cantidades están en función del proceso que se emplee. Para la reutilización del agua no puede darse fórmula alguna, ya que cada fábrica tiene su propia serie de problemas.

Se llama agua blanca al agua que drena, sin importar su color, de la pasta húmeda en las operaciones de fabricación de pulpa y papel. Además de la fibra, el agua blanca puede contener otros materiales dependiendo del tipo de pasta, tipo de los elementos no fibrosos de la misma, el tamaño de la tela y la cantidad de succión aplicada a la hoja húmeda, en general el agua blanca contiene:

- Fibra residual y fibras pequeñas.
- Materia soluble.
- Alto porcentaje de materia no fibrosa en suspensión (pigmentos, almidones y colorantes)

En general, la relación entre la materia finamente dividida (desperdicios de fibras, rellenos) y la fibra, es más elevada en el agua blanca que en la formulación original. La cantidad total de materia sólida en el agua blanca varía en gran medida de una fábrica a otra, según sea el grado de papel y el tratamiento del agua blanca. Dependiendo del producto terminado, ya sea pulpa o papel. Las aguas blancas pueden clasificarse, de acuerdo con su contenido de fibra, en pobres y ricas. La reutilización del agua es general en las industrias de la pulpa y del papel, y esta aumentando debido, principalmente, a motivos económicos tales como:

- Reducir las pérdidas de fibras, finos y cargas.
- Reducir el costo en la compra o procesado del agua fresca.
- Obtener un costo reducido para el calentamiento de los flujos de proceso.

La tendencia es hacia la máxima recirculación de aguas tratadas, aguas de lavado a contracorriente y hacia la reutilización del agua blanca, el último punto adquiere una mayor importancia en una época preocupada por la conservación de la energía. El agua rica se regresa en general directamente al tanque de mezcla, a los batidores, o a otros puntos como agua de fabricación.

Las operaciones de lavado, depuración y espesamiento de la pulpa, tienen diversos sistemas de flujo, dependiendo del uso final del producto. La pulpa húmeda puede ser blanqueada o sin blanquear; el agua se puede eliminar en espesadores o secadores, o bien la pulpa puede usarse directamente en la máquina de papel. Por consiguiente la fuente de agua blanca para reutilizarse en cualquier etapa de las operaciones de fabricación de pulpa debe de ser cuidadosamente escogida. La cantidad de agua blanca empleada varía de una fábrica a otra.

La preparación de la madera en la fabricación de pulpa requiere una gran cantidad de agua, y es práctica general el recircular el mayor volumen posible de agua, completando el déficit con otros efluentes que entren a la planta.

El agua blanca de los espesadores se puede usar en los molinos, dado que ya se le ha separado la mayor parte de las fibras.

El proceso de lavado es algo parecido al que se sigue en el destintado del papel en donde en el paso final se puede usar, si se selecciona adecuadamente, algún otro efluente que entre a la planta; en caso contrario se utiliza agua fresca, esto último se recomienda cuando el producto terminado requiere una mayor blancura.

La pulpa que sale de la operación de lavado contiene astillas pequeñas de madera y otras partículas extrañas que se eliminan en un proceso de dilución y depuración. La dilución se efectúa, por lo general, en ciclo cerrado, recirculando agua del siguiente paso del proceso, por ejemplo, del espesamiento en un filtro a vacío de tambor rotatorio. El agua de reposición se puede obtener de algún otro proceso subsecuente.

Los requerimientos de agua para el proceso de blanqueo varían según el tipo y número de pasos y las especificaciones de la pulpa blanqueada. De los espesadores se recircula la mayor cantidad posible de agua. Su reutilización es limitada porque una de las funciones de este tipo de agua es la eliminación de materiales solubles resultantes de la operación de blanqueo. En consecuencia, es necesario reponer agua. Para este propósito, por lo general, se usa agua fresca; la cantidad empleada depende de la blancura que se desee en la pulpa.



La mayoría de las fábricas intentan usar, sistemas cerrados y algunas lo logran con todo éxito, especialmente en donde el agua clarificada de los recuperadores de la fibra de la máquina de papel se utiliza en la fábrica de pulpa. En un sistema cerrado el agua blanca rica (como la de las charolas, las cajas de succión, de la fosa de la tela y de la fosa del cilindro de succión) se usan en la pila y para diluir la pasta antes de que pase a la caja de entrada, cuando esta demanda de agua se satisface, el agua blanca sobrante junto con cualquier agua blanca pobre, se envía a un recuperador de fibras. Algunas fábricas disponen de tanques para recibir estas dos clases de agua blanca de modo que el agua rica siempre se utilice primero.

El proceso de fabricación de papel es esencialmente un sistema con el cual la pulpa se diluye a una consistencia muy baja (aproximadamente un 0.5%) y se procesa a régimen continuo a altas velocidades, dándole la forma de hojas de papel, para después eliminar el agua por filtración, compresión y secado en la siguiente figura No.3.1 se muestra el porcentaje de agua que se pierde durante el proceso.

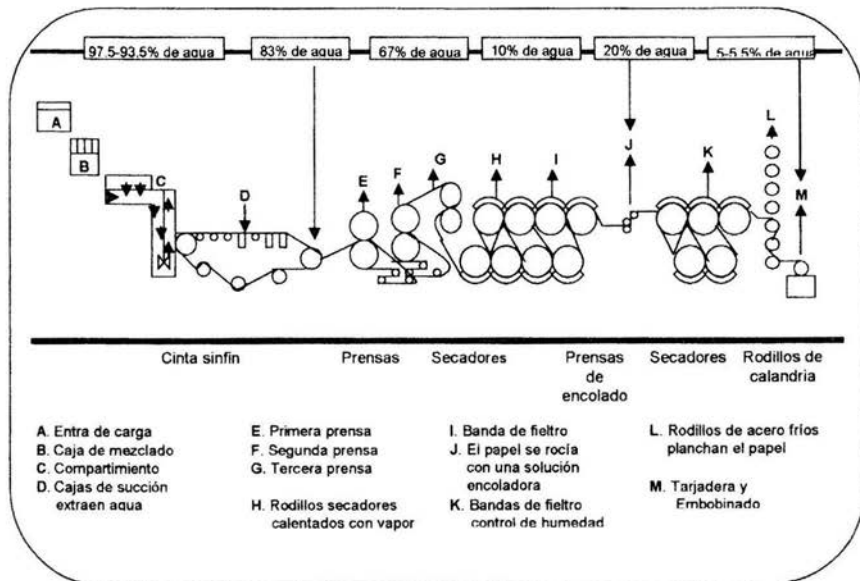


Fig. 3.1 Porcentaje de agua reciclada en la máquina de papel

Algunas fábricas encuentran factores limitantes que impiden cerrar el sistema, estos factores son básicamente económicos y, en tales casos, el costo de la reutilización del agua blanca debe de considerarse con respecto a la cantidad y calidad del papel producido. Entre los factores limitantes de la reutilización del agua blanca se incluyen los siguientes:

- Problemas de impurezas orgánicas.
- Formación de espuma.
- Formación de incrustaciones.
- Frecuentes cambios de fabricación y de color en la máquina de papel.

Todos los puntos anteriores impiden reutilizar el efluente de los recuperadores de fibra, mantener limpias las líneas de agua blanca y tener abiertas las espreas y regaderas.

Las prácticas de conservación del agua varían ampliamente en las fábricas de pulpa y papel, como ya se ha mencionado anteriormente, un buen programa sobre la reutilización del agua, representa muchos beneficios económicos y financieros; y, especialmente en lo que se refiere a la conservación de la fibra, se puede aplicar la siguiente regla ***“a menor pérdida de agua, menor pérdida de fibra”***.

### 3.5 Tratamiento de los efluentes en el proceso Kraft.

---

La reutilización del agua, la recuperación de componentes valiosos, y otros criterios semejantes, son aspectos importantes a considerar para reducir el impacto contaminante. Asimismo la segregación o agrupamiento de corrientes es un aspecto técnico a considerar, los vertidos provenientes del área de producción son los que están involucrados directamente con la transformación de la madera. Las principales etapas que pueden generar contaminación en el proceso son:

Descortezado de la madera. La cantidad de agua utilizada es relativamente baja en los sistemas de descortezado en seco que se emplean en la actualidad. El descortezado en húmedo genera los mayores caudales residuales de cualquier fábrica. Esta agua arrastra tierra, polvo de corteza en suspensión y sustancias orgánicas en disolución, entre ellas taninos.

Pulpaje. El proceso químico kraft se caracteriza por una reducción importante en la contaminación por vertidos líquidos, porque el proceso incluye la unidad de recuperación de reactivos que se basa en la combustión de la materia residual de la digestión de la madera para generar energía calorífica. De todas maneras el agua de desecho contiene cantidades significativas de sólidos suspendidos, DQO alta, y es coloreada, presentando además una fuerte alcalinidad.

Blanqueo. Debido a las modificaciones realizadas y aplicadas a los procesos de blanqueo (aumento de la deslignificación, cambio de los agentes blanqueadores y reutilización de agua) los efluentes provenientes de este proceso en las fábricas modernas tienen menor DQO, AOX y color, en comparación con los efluentes generados de los procesos tradicionales de blanqueo con gas cloro. En los procesos tradicionales la cantidad de agua utilizada en el lavado puede variar desde los 3m<sup>3</sup>/ton de pulpa mecánica hasta 343m<sup>3</sup>/ton de pulpa kraft, debido a los cambios en la tecnología de blanqueo estos caudales han sido reducidos, como se muestra en la siguiente figura No. 3.2 donde se divide básicamente en 2 etapas: proceso productivo y de recuperación.

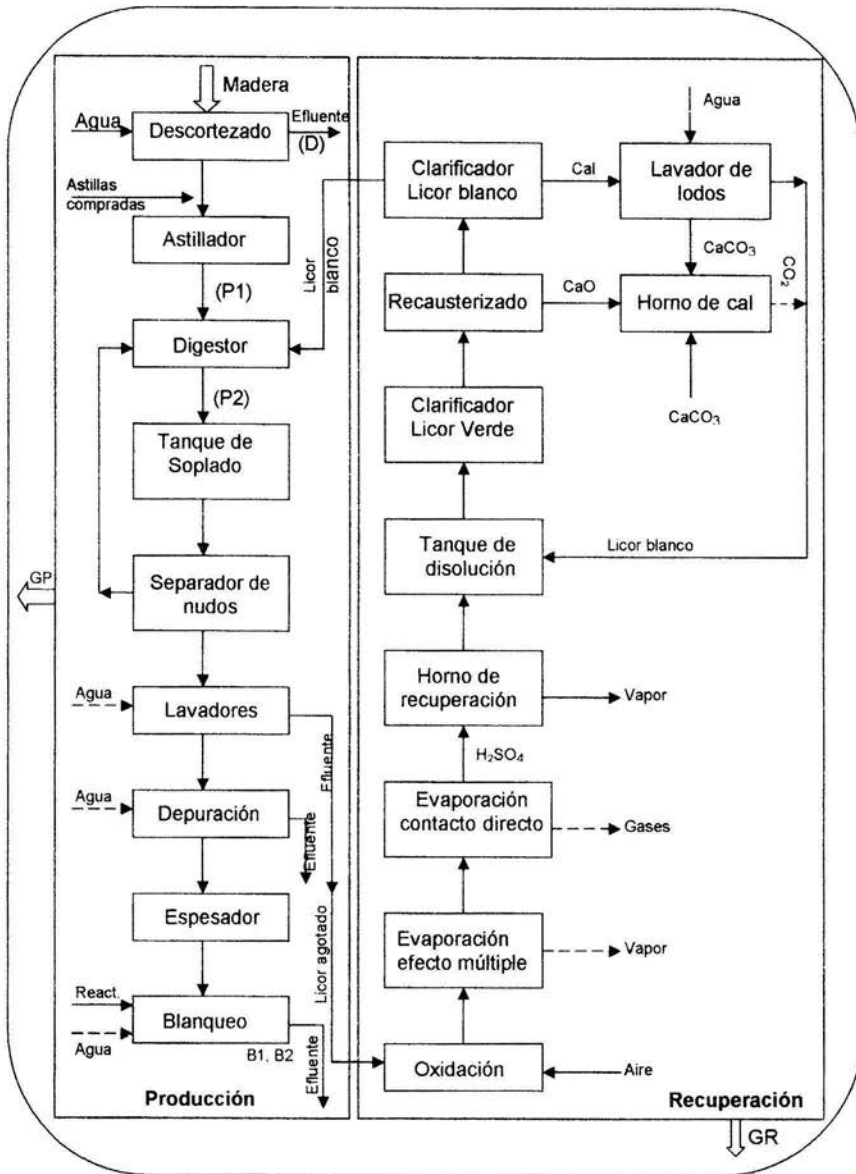


Fig. 3.2 Diagrama del agua utilizada en el proceso kraft

Inicialmente se realiza una clasificación de las distintas corrientes generadas en una planta de producción de pasta de celulosa según el proceso kraft, en la figura No. 3.2 se ubica tanto las corrientes globales seleccionadas como de las corrientes parciales.

En la selección de los vertidos parciales, se consideran las corrientes con elevada carga orgánica y toxicidad. Algunas de estas corrientes son:

Corrientes parciales seleccionadas:

- Descortezado (D)
- Digestión (P1)
- Condensado (P2)
- Efluente de la etapa de cloración (blanqueo) (B1)
- Efluente de la etapa de extracción alcalina (blanqueo) (B2)

Corrientes globales seleccionadas:

- Global producción (GP)
- Global recuperación (GR)
- Final (F)

El objetivo de cualquier tratamiento es eliminar los componentes definidos como contaminantes, molestos o con efectos nocivos para el medio ambiente, y ajustar la calidad del agua vertida en función a las especificaciones legales. Tras conocer las características de las aguas residuales del proceso kraft, se describirán algunos de los tratamientos a las que se someten este tipo de aguas. Con la incorporación de los circuitos cerrados de agua, descritos con anterioridad, se evita en parte el problema, ya que en lugar de vertir el efluente directamente al río o alcantarilla, éste se depura y reutiliza para producir nuevo papel. La problemática del efluente de este proceso (kraft) se resume en los principales contaminantes presentes, los cuales son:

Todos los parámetros que a continuación se mencionan servirán básicamente para comenzar a clasificar y caracterizar las aguas, para su posterior tratamiento previo al

vertido, con el objeto de reducir al mínimo los impactos negativos sobre los cauces que soporten tales vertidos, estos son:

- SST (Sólidos Suspendidos Totales).
- pH (Potencial de Hidrógeno).
- Color.
- DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno).
- DQO (Demanda Química de Oxígeno).
- AOX (Halogenos Orgánicos Absorbibles).

### **Remoción de Sólidos Suspendidos Totales.**

#### ***Tratamiento Primario.***

El tratamiento primario de estos circuitos elimina básicamente la materia en suspensión presente en la pulpa y en los desperdicios de papel. Está formada fundamentalmente por partículas de corteza, fibras, desperdicios de fibras y materiales de carga y de recubrimiento tales como el caolín, el carbonato de calcio (recuperadas de la reutilización de las aguas blancas), estas son recicladas adecuadamente cuando lo permiten los requisitos de calidad o de otra forma son totalmente retirados del proceso para evitar acumulaciones innecesarias. Se utilizan tres métodos generales para eliminar este material: *Sedimentación Flotación y Filtración*. Debido a las propiedades de taponado y obstrucción de los desperdicios de pulpa y de papel, por lo general no se utilizan mallas finas, microfiltros o filtros de presión. Además un sistema adecuado de filtración cuesta aproximadamente lo mismo que un sistema clarificador y sus problemas inherentes son mayores. Algunos de los sistemas de uso más frecuentes en la industria son, el de sedimentación por gravedad, el de flotación y el de filtración de espuma o el sedimentador de alta tasa. A continuación se describirán algunos de ellos.

Sedimentación. Por lo general, este sistema de sedimentación va precedido por rejillas de barras, con el propósito de eliminar todas las partículas de suciedad con un tamaño ( $> 0.15$  mm de diámetro), esto se logra manteniendo una velocidad promedio menor de 0.76

m/min. La criba autolimpiante debe diseñarse con ranuras de aproximadamente 15.8 mm, para evitar los problemas operativos de tipo mecánico.

La mayoría de las fábricas de pulpa y papel tiene sedimentadores primarios. El tipo que predomina es el sedimentador circular que se limpia, mecánicamente. En general las fábricas no adicionan floculantes o coagulantes a los sistemas de clarificación primaria, ya que los sólidos tienen buenas características de asentamiento. La eficiencia en la eliminación varía según el tipo de papel producido, aproximadamente se experimenta una eliminación de sólidos en suspensión del 80 al 90%, en (fábricas de destintado, kraft de blanqueo, cartón de desperdicio, papel fino, cartón aislante, periódico, papel para envolver, etc.). Esto equivale al 95-100% de los sólidos sedimentables, ya que no toda la materia en suspensión se sedimenta. La materia suspendida que se ha eliminado tiene cierta cantidad de  $\text{DBO}_5$  asociadas con los sólidos en suspensión, el resto está presente como material disuelto.

Por lo general, un clarificador primario limpiado mecánicamente consiste en un gran tanque circular de concreto con un sistema de rastras en el centro. Usualmente el flujo de agua residual entra en el tanque procedente de un pozo situado en una columna central. El sedimento se mueve hacia un sumidero central o a una tolva concéntrica, y se elimina mediante bombeo. El sistema motriz de las rastras debe tener torque suficiente para operar en situaciones de carga pesada, y se requieren alarmas confiables de corte del torque con el fin de proteger el mecanismo impulsor. Las rastras deben estar cercanas al fondo, para evitar que los sedimentos se acumulen y puedan descomponerse anaeróbicamente. El fondo del clarificador se inclina hacia el centro con una pendiente aproximada de 1:12. El material flotante se recoge por medio de un desnatador unido a un mecanismo giratorio, y se descarga hacia una tolva. Una fábrica típica puede tener de 0.36 a 6  $\text{Kg/m}^3$  (350 o 600 ppm) de sólidos en suspensión fluyendo hacia el clarificador primario y con una eficiencia del 90% en la eliminación habría de 0.036 a 0.06  $\text{kg/m}^3$  (35 a 60 ppm) en la salida del clarificador.

Flotación. En algunas fábricas se aplica la flotación del aire como la técnica primaria para la remoción de sólidos suspendidos totales. En ciertos casos puede eliminarse hasta el 98% de sólidos en suspensión. El aire se introduce a presión en el efluente que entra por la parte baja de una unidad de flujo ascendente. El aire supersaturado se libera bajo la

forma de burbujas muy finas de aire que se unen a los sólidos en suspensión llevándolos hacia la superficie. Un limpiador mecánico elimina la espuma del material flotante, separándolo del efluente clarificado que se vierte a la unidad, este dispositivo básico ha sido utilizado durante muchos años como recuperador. Una modificación del dispositivo, cuenta con laminillas internas que permiten una velocidad del efluente más elevada, requiriendo a la vez menos espacio. Para obtener resultados aceptables de una unidad de flotación debe adicionarse una ayuda floculante tal como el alumbre con o sin un polielectrólito. La flotación por aire no es sensible a la temperatura, pero se afecta por fluctuaciones grandes en la carga de sólidos. La sensibilidad al flujo se elimina dando más tamaño a la unidad y operando con un flujo fijo, parte del agua tratada se envía de nuevo automáticamente a la entrada. La flotación es muy eficaz para eliminar materiales cuyo peso específico es próximo a 1, pero no para eliminar aquellos cuyo peso específico es mayor. Existen varios tipos de equipos de flotación, algunos de ellos son:

- DAF (Disolved Air Flotation). Esta ocurre cuando el aire es inyectado al agua residual, la cual esta a presión, al disminuir la presión al agua en el tanque, se desprenden finas burbujas.
- IAF (Induced Air Flotation). En este proceso las burbujas de aire se generan directamente en el seno del líquido mediante un aireador.
- AF (Air Flotation). Este es el proceso más simple, y consiste en saturar el agua con aire mediante difusores.

Sedimentador de alta tasa. Para mejorar la eficiencia de los sedimentadores por gravedad y/o aumentar la velocidad de carga superficial, se han ideado clarificadores de tubo (llamados también barreras de flóculos). El clarificador de tubos es una matriz de tubos plásticos paralelos con sección transversal aproximada de 5 cm o en forma de V invertida. Con inclinación de 60° de la vertical. Como las partículas por eliminar tienen un largo recorrido hidráulico que efectuar, y las corrientes de convección se eliminan en buena medida, se logra obtener un asentamiento más eficaz. Los dispositivos encuentran aplicación en los casos en que los clarificadores existentes están sobrecargados o cuando el espacio disponible es muy escaso. Una mejora aplicable al clarificador de tubos es el separador de laminillas, en el que los tubos son sustituidos por placas inclinadas. Se trata de una unidad de flujo descendente, en tanto que el sistema de tubos opera en forma ascendente. El líquido y los sólidos pasan en la misma dirección hacia abajo entre las



placas. El flujo clarificado retorna a la superficie y se derrama por tubos de salida verticales. El sedimento se desliza por las placas inclinadas hacia el fondo de la unidad. Estos dos avances parecen presentar ventajas técnicas, pero deberá realizarse una cuidadosa prueba en planta piloto en el lugar del trabajo para comprobar si pueden lograrse dichas ventajas en la aplicación particular de que se trate.

Después de la clarificación primaria, el agua residual pasa a recibir un tratamiento biológico secundario. Si el agua residual procedente de la fábrica tiene una composición muy variable, puede resultar aconsejable instalar un recipiente igualador entre el clarificador primario y el sistema de biotratamiento, en especial si se utiliza un sistema de biotratamiento a gran velocidad.

### **Remoción del Color.**

El agua de desperdicio coloreada de la pulpa y papel procede de tres operaciones distintas que son las siguientes, aunque la mayor proporción corresponde a las dos primeras.

- La producción química de la pulpa.
- El blanqueo de la pulpa.
- La producción de papel de color.

La operación de blanqueo produce más carga de color que la producción de pulpa, y el flujo dominante en color en la planta de blanqueo procede de la etapa de extracción cáustica, en el caso de la fábrica kraft de pulpa blanqueada, pueden generarse 150kg de color/ton, de las cuales la pulpa contribuye con 32.5Kg, y la planta de blanqueo con 100kg, en donde la etapa de extracción cáustica aportara 72.5kg, y el color restante 17.5kg procede del patio de almacenaje de la madera, de la recuperación del caustificado, y de la fábrica de papel. Se cuenta con dos métodos alternos con relación al problema del color.

1. Control en la planta, y
2. Tratamiento externo.

Algunas de las tecnologías alternas que pueden aplicarse al problema de color son basadas en el concepto de efluente libre de fábrica, la producción de pulpa con oxígeno, el blanqueo por oxígeno, el blanqueo en contracorriente, el blanqueo por desplazamiento, y la prevención y control en los derrames de la fábrica. Con respecto a las tecnologías externas, desde los años 50's se inicio una investigación en busca de un método económico para eliminar el color. Se ha probado una alta variedad de coagulantes en cuanto a su efectividad para eliminar el color, entre ellos están: alumbre, sulfato férrico, cal, ácido sulfúrico, carbón vegetal, arcilla, carbón activado, sílice activado, cloruro férrico, ácido fosfórico, licor de salmuera del desperdicio y un compuesto de silicato alúmina bario. Puede lograrse buena reducción en el color si se usan varios de los productos anteriores, pero el costo del tratamiento químico es prohibitivo. La mejor alternativa para la precipitación desde el punto de vista de los costos es la del tratamiento mediante cal.

Coagulación de la cal. La cal es atractiva debido al papel importante que tiene en los sistemas de recuperación química del proceso kraft. El sistema de recuperación ofrece una doble oportunidad para:

1. Recuperación de la cal utilizada para eliminar el color.
2. La destrucción del color ya eliminado mediante oxidación térmica convencional.

1. El sedimento con cal y color que se produce es difícil de desaguar. El primer método para eliminar este problema consistió en utilizar una masa grande de cal, de manera que la porción de cuerpos coloreados fuera sólo una pequeña fracción del material por desaguar. En este proceso, el suministro total de cal de la fábrica se reduce y reacciona con un pequeño volumen de agua muy coloreado, por lo general la cal de la planta de blanqueo tiene una concentración del orden de 20 000 mg/l. La cal se asienta, desagua, y utiliza para el caustificado del licor verde. El efluente que se esta sometiendo a la eliminación pasa a un clarificador, en donde se elimina cal en exceso por precipitación. Este sedimento fluye al lavador de lodo, y en su momento llega al horno de cal, este proceso llega a eliminar de 94 a 95% del color, lo que equivale al 72% de reducción de color en los efluentes de las fábricas. Se han evaluado planes para el tratamiento del lodo de cal en el que se mezcla una cantidad mínima de cal apagada y la totalidad de la producción de lodo de cal de la fábrica, haciéndolas reaccionar con el agua. El sedimento se desagua y se quema en el horno de cal.

2. En este proceso el agua procedente de la fábrica después de eliminar las impurezas y la tierra, se envía mediante bombas a un clarificador, en donde la cal, se agrega en la entrada del clarificador. La presencia de finos de fibras ayuda a la eliminación de color. Aproximadamente el 60% de la cal, la mayoría del color y virtualmente todos los sólidos sedimentables se depositan en el fondo del clarificador.

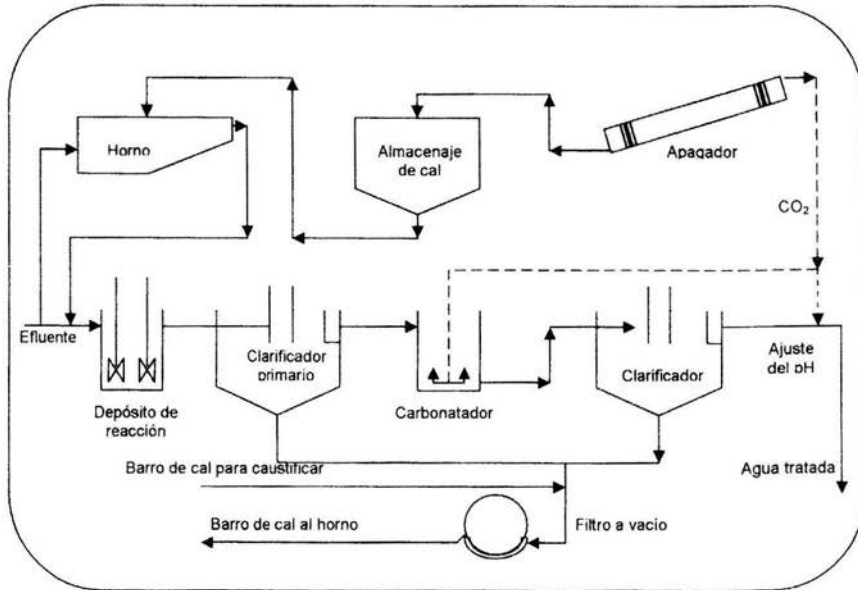


Fig. 3.3 Proceso de eliminación del color por coagulación de la cal.

Los materiales sedimentan fácilmente porque el clarificador está diseñado a  $58680 \text{ l/día/m}^2$  lo que es aproximadamente el doble de la capacidad tradicional del diseño. El sedimento del clarificador primario se retira, se espesa en centrifugas, y se quema en el horno de cal. El derrame del clarificador se trata con dióxido de carbono del gas del horno de cal, que convierte la cal soluble en cal insoluble. Esta última se bombea al tanque de almacenamiento de lodo del proceso de caustificado para desaguarlo en un filtro de lodo de cal, y a continuación se quema en el horno de cal. El horno tiene un tamaño en exceso del 25%, con el fin de recibir el sedimento para eliminación del color. El proceso es capaz de lograr el 85 a 93% de eliminación del color en el efluente total de la fábrica. En la figura No. 3.3 Se ilustra este método.

Coagulación del alumbre. Este tratamiento ha mostrado su capacidad para lograr la eliminación del 90% del color con dosis de 30mg/l en el caso de las aguas residuales del proceso kraft de maderas suaves y 150 mg/l en los desperdicios de maderas duras. El tratamiento consiste en la neutralización, la adición de nutrientes, el igualado, el tratamiento de lodos activados, la coagulación con alumbre, la sedimentación, el filtrado con arena, el tratamiento en un estanque refinador, y el reaereado. En la etapa de coagulación se utiliza alumbre en una proporción de 30ppm como  $Al_2O_3$  y el floculante poliacrílamido a razón de 1ppm. El tiempo de retención en el clarificador es de 6 h. El color del agua de desperdicio a granel promedia 100 unidades y el agua tratada 10 unidades, obteniéndose así el 90% de reducción de color. Otro tipo de tratamiento consiste en una clarificación primaria, bioxidación utilizando oxígeno de elevada pureza, sedimentación secundaria, y por ultimo coagulación del alumbre y sedimentación. El sedimento de clarificador primario, los sólidos biológicos en exceso, y el sedimento del alumbre, se mezclan, se sedimentan, se filtran a presión y se queman en un horno de hogares múltiples. Las cenizas del horno, con alto contenido de  $Al_2O_3$  se hacen reaccionar con ácido sulfúrico, para recobrar el aluminio bajo la forma de sulfato de aluminio. La recuperación del alumbre es del 94%. El color final del flujo es de 50 unidades, cuando el color inicial esta en el rango de 800 a 1200 unidades, o sea un 94% o más de eliminación.

Existen otros métodos para eliminar el color, los cuales solo se mencionarán, pero no se llevara a cabo la descripción de estos, algunos de ellos se encuentran en etapa de investigación.

- Absorbentes poliméricos y resinas de intercambio iónico.
- Carbón activado.
- Procesos con membrana.
- Tratamiento con aminas.
- Precipitación con agua del mar.
- Ozonización.

Con respecto a las resinas de intercambio iónico no han sido probadas con éxito para la eliminación del color, el carbón activado es un material que se caracteriza por su gran área superficial que da por resultado una importante capacidad de adsorción, pero el elevado costo del carbón y su exigencia en la regeneración, ha evitado que se aplique.

## **Remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO.**

### *Tratamiento Secundario o Biológico.*

Todos los desperdicios que se generan en la industria del papel son susceptibles de un tratamiento biológico para reducir la DBO<sub>5</sub> y DQO. El sistema de biotratamiento lleva a cabo una ligera reducción en el color de las aguas residuales, pero lamentablemente no en la medida requerida en la mayoría de los casos. Los tratamientos biológicos de uso más común en la industria de la pulpa y papel son:

- Lagunas de estabilización.
- Lagunas aireadas.
- Reactores biológicos: Lodos activados, Aireación extendida, etc.

Lagunas de estabilización. Este es el primer sistema de biotratamiento adoptado por la industria, se creó como respuesta a la necesidad de limitar la descarga del efluente hacia ríos que periódicamente tienen un caudal reducido. De esta manera se construyeron grandes estanques de almacenaje, estos ofrecían un ambiente adecuado para el desarrollo de los organismos, obteniendo así un tratamiento biológico. En este tipo de sistemas la simbiosis, entre bacterias y algas se aprovecha para degradar la materia orgánica, las lagunas facultativas consumen materia orgánica, oxígeno y producen CO<sub>2</sub>, mientras que las de oxidación consumen CO<sub>2</sub> y producen oxígeno por medio de fotosíntesis, lo que mantiene concentraciones de oxígeno adecuadas en la zona superior de la laguna.

Este tipo de tratamiento tiene dos ventajas principales: puede amortiguar los derrames accidentales de los desperdicios fuertes sin alteraciones, y no cuenta con dispositivos mecánicos con sus problemas inherentes de mantenimiento. Los tiempos de retención están entre 40 y 60 días, con esto se logra una eficiencia de remoción de la DBO soluble del 95% y en coliformes del 99%.

Lagunas aireadas. Es una ampliación natural del concepto de lagunas de estabilización, las cuales se distinguen de aquellas debido a que cuentan con aireación artificial, generalmente logradas por aireadores flotantes. El sistema se complementa por un

tanque de separación de la biomasa producida, el cual puede ser un sedimentador convencional o bien una laguna facultativa. Algunas de las características de este tipo de lagunas son: profundidad que varía entre 2 y 5m y los requerimientos mínimos para lograr una agitación aceptable es de  $0.8\text{hp}/10\text{m}^3$  de reactor, los tiempos de retención son aproximadamente 20 días. En cualquiera de los dos tipos de lagunas, la evacuación de los lodos producidos se efectúa en intervalos de 1 a 3 años.

Para aumentar la actividad biológica es necesario aumentar el ritmo del aireado mediante medios mecánicos y agregando nutrientes al sistema. Para los sistemas de lodo activado a gran velocidad se recomienda agregar nutrientes a la proporción de 100:5:1 para  $\text{DBO}_5:\text{N}:\text{P}$ , este sería el límite superior de un sistema de laguna aireada, algunas fábricas afirmaron haber obtenido buenos resultados con 0.18 Kg de P, 1.73 Kg de N por 45 Kg de  $\text{DBO}_5$  eliminado. Cuanto más prolongado es el tiempo de retención menos importante es el nivel de nutriente. Muchas fábricas no agregan fósforo y, como norma, adicionan nitrógeno a una proporción de 50:1,  $\text{DBO}_5:\text{N}$  para un tiempo de retención de 4 días y 100:1  $\text{DBO}_5:\text{N}$  para un tiempo de retención de 10 a 15 días. Los nutrientes que con más frecuencia se agregan son el amoníaco y el ácido fosfórico. En la industria de la pulpa y papel es usual un tiempo de retención de 5 a 10 días, pero muchos sistemas llegan hasta 20 días. Con estos tiempos, la eficacia en la eliminación de encuentra normalmente en el margen de 80 a 90%, produciendo un agua residual con  $\text{DBO}_5$  de aproximadamente 30ppm.

A medida que desciende la temperatura del sistema, desciende también la eficiencia en la eliminación de la DBO, con temperaturas inferiores a  $20^\circ\text{C}$ , son usuales eliminaciones de DBO tan bajas como del 70-75%, por lo que esta sensibilidad para con la temperatura es un inconveniente importante en el tratamiento.

Lodos Activados. En situaciones de que se dispone de poco espacio, o en que la laguna de estabilización o laguna aireada no cumple las exigencias relativas a los sólidos en suspensión, una alternativa es el proceso de lodos activados o una de sus modificaciones. Este proceso es indudablemente uno de los más aplicados en el mundo, su versatilidad y criterios de diseño bien definidos los han llevado a ser una de las opciones más importantes para el tratamiento de aguas residuales. El lodo activado es una suspensión de microorganismos, activados y muertos en un efluente de materiales orgánicos

coloidales, suspendidos o disueltos y materiales inorgánicos, basados en sus reacciones metabólicas para degradar sustancias orgánicas al contacto íntimo de los microorganismos con el agua residual. En estos sistemas, los microorganismos crecen en una suspensión lograda por la agitación relativamente vigorosa, creadas por los equipo de aireación (generalmente se utilizan turbinas o difusores de aire comprimido).

Los procesos de lodos activados cuentan con un tanque de aireación en donde se llevan a cabo las reacciones biológicas bajo condiciones totalmente aerobias, y de un sedimentador llamado secundario, que separa la biomasa del agua tratada. Los microorganismos sedimentados son recirculados hacia el tanque de aireación, con objeto de mantener una concentración determinada de sólidos entre 2000 y 4000 mg/l.

El proceso incluye la oxidación controlada con un cultivo mezclado de bacterias. En el proceso se neutraliza el licor de salida, se agregan los productos químicos nutrientes, y el licor se airea en un reactor, en presencia de un cultivo bacterial. Es un proceso de a alta velocidad se recupera y recicla un parte de las bacterias. El tiempo de retención es de 3 a 8 horas, y el exceso de sólidos que se produce se purga desde el fondo del sedimentador secundario (separa la biomasa del agua tratada). Estos sólidos crean un problema de eliminación del sedimento, lo que se considera como una de las principales desventajas del proceso. El sedimento es sumamente difícil de desaguar, y por lo general tiene que mezclarse con sedimentos primarios, cortezas o cenizas volátiles antes de que se le pueda desaguar en forma satisfactoria. La cantidad de sedimento generado va desde 0.23 a 0.34 Kg/kg de  $\text{DBO}_5$  eliminada, con una eficiencia del 80 al 90%. El volumen del sistema es tan reducido que es insensible a la situación operativa en el invierno, a diferencia de lo que ocurre con la laguna de estabilización aireada. Sin embargo, si la temperatura del flujo de la fábrica se eleva más allá de  $38^\circ\text{C}$ , tiene que ser enfriado antes de someterlo a tratamiento. El breve tiempo de retención y el escaso volumen del sistema hacen a este proceso susceptible a las alteraciones en el proceso, después de las cuales pueden requerirse de 2 a 3 semanas para que el sistema vuelva a su eficiencia operativa óptima.

En la industria se han realizado pruebas acerca de dos modificaciones del proceso de lodos activados: la estabilización por contacto y la aireación extendida. Ninguno de los dos ha demostrado ser superior al proceso tradicional. El obstáculo más importante en cuanto a la aplicación en aumento del proceso de lodos activados son los altos costos de

capital y de operación, que llegan al doble en muchos casos a los correspondientes al de las lagunas aireadas. Existen modificaciones a este tipo de tratamiento los cuales se mencionaran a continuación, pero no se describirán, tales modificaciones son:

- Lodos activados con oxígeno puro.
- zanja de oxidación.
- Sistemas de biotratamiento en dos etapas.
- Filtros de goteo y,
- Biodiscos.

Aireación Extendida. Este proceso opera con un alto tiempo de retención de sólidos, resultando una condición donde el sistema carece de alimento suficiente para soportar los microorganismos presentes, esto ocasiona que exista competencia entre ellos por el alimento remanente y además se comen entre ellos. Esta situación competitiva da como resultado un efluente altamente tratado con baja producción de lodos. Los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica son similares a aquellos que se encuentran en el proceso de lodos activados.

El proceso de aireación extendida puede tener lugar en estanques de oxidación o estanques naturales como lagunas, que a diferencia de las lagunas facultativas, se encuentran totalmente mezcladas por diferentes tipos de aireadores o difusores de aire. Este tipo de tratamiento se ve limitado a plantas pequeñas, pues en plantas grandes sus costos iniciales y sus altos costos de operación no le permiten competir con otras alternativas de tratamiento biológico.

Existen múltiples opciones para el biotratamiento, y la mejor elección para determinada fábrica debe decidirse sobre la base de ocho criterios:

1. La eficiencia en la eliminación de la DBO5 y de los sólidos en suspensión.
2. La cantidad de atención requerida por parte del operador.
3. La sensibilidad en relación con el estado de tiempo.
4. La resistencia a las situaciones de carga de choque.
5. La energía requerida.
6. La demanda de nutrientes.



7. El rendimiento en sedimentos y,
8. Las necesidades del espacio.

El sistema que ocupe el primer lugar desde estos puntos de vista, determinado por las circunstancias particulares de la fábrica, son la primera elección. Con base en experiencias, el de lodos activados es el sistema más popular que se utiliza en la industria de la pulpa y papel. La mayoría de los sistemas, son satisfactorios en cuanto a la eliminación de la DBO<sub>5</sub>. La preferencia en cuanto a otros criterios determinara el sistema por elegir. Los desperdicios que se generen en cada caso deberán tenerse muy en cuenta al llevar a cabo la elección del mejor sistema.

### **Desinfección.**

Esta fase del tratamiento se utiliza para eliminar los microorganismos presentes en el agua residual tratada. La desinfección del agua consiste en la destrucción de organismos que causan enfermedades en el hombre, algunos de los métodos que se utilizan son:

- Cloración.
- Ozonización.
- Luz Ultravioleta.

Cloración. Este método es el que más comúnmente se utiliza, y consiste en la dosificación de cloro a partir de un producto químico tales como: hipoclorito de sodio, cloro en fase gaseosa, el primero se utiliza en las plantas pequeñas y el gas cloro en las demás aplicaciones. El cloro no forma trihalometanos, además es medible y controlable. Para proveer el tiempo de contacto suficiente para llevar a cabo la desinfección, se utilizan cámaras de contacto de cloro, en el tanque se colocan mamparas deflectoras para propiciar un buen mezclado mediante la distribución del flujo en la sección transversal de la cámara de contacto. Lo dosis del cloro dependerán de las características del agua residual.

Ozonación. Es interesante señalar que el uso del ozono como desinfectante es más antiguo que el del cloro. Entre sus ventajas se tiene la elevada eficiencia para eliminar

virus, la capacidad para controlar problemas de olor, sabor, color y el hecho de que su producto de descomposición sea el oxígeno, el cual es compatible con el medio ambiente. Adicionalmente, su funcionamiento no se ve afectado por el pH ni por el contenido de amoníaco. Estas cualidades hacen que el ozono tenga cierta preferencia sobre otros medios de desinfección. Entre sus desventajas está que se debe de producir eléctricamente (4000 a 30 000 V, con una frecuencia de 500 a 1000 Hz) en la medida en que es empleado, no puede almacenarse y es difícil adaptarlo a las variaciones de carga.

El ozono es producido haciendo pasar una corriente de aire seco o de oxígeno a través de un campo de alto voltaje llamado corona de descarga, donde el oxígeno en la corriente es convertido a ozono, tiene un poder de desinfección 152% más que el cloro. El aire ozonizado es aplicado al punto de dosificación a través de un eyector, el cual deberá estar bien diseñado.

Luz Ultravioleta. Existen desinfectantes físicos como la luz y el calor. La luz solar es buen desinfectante debido a la radiación ultravioleta (UV). La eficiencia del proceso depende de la penetración del rayo dentro del agua. Estos rayos destruyen bacterias, virus y hongos. Uno de los problemas de la luz ultravioleta es la interferencia de la materia suspendida y las moléculas orgánicas disueltas que absorben la energía UV antes de que lleguen a los microorganismos.

La desinfección del agua residual mediante radiación ultravioleta es una técnica relativamente nueva que provee buena eficiencia con costo efectivo menor. Existen diferentes medios para generar el rayo con longitud de onda de 240-270nm asegurando largo tiempo de contacto con consumo mínimo de energía. Las lámparas de baja presión de mercurio emiten radiación monocromática de 253.7nm, que es la óptima para desinfectar, este tipo de lámparas son las más usadas en el tratamiento para la desinfección por luz ultravioleta. La tabla No. 3.4 muestra la comparación de estos tres métodos.

| Variable            | UV (Luz ultravioleta) | Ozono        | Cloro        |
|---------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| Tiempo de contacto  | 1 a 10 seg.           | 10 a 20 min. | 30 a 50 min. |
| Tanque de reacción  | ninguno               | Requerido    | requerido    |
| Mantenimiento       | mínimo                | considerable | mediano      |
| Instalación         | sencilla              | complicada   | complicada   |
| Influencia de:      |                       |              |              |
| Materia suspendida  | alta                  | Alta         | alta         |
| Temperatura.        | ninguna               | Alta         | alta         |
| pH                  | ninguna               | Baja         | alta         |
| Residuos en el agua | nulo                  | mínimo       | presentes    |
| Influencia del agua | nula                  | presente     | presente     |
| Corrosión           | ninguna               | presente     | presente     |
| Toxicidad           | bajo                  | alto         | bajo         |

Tabla 3.4 Comparación de los principales métodos de desinfección.

### **Tren de Tratamiento Propuesto.**

En la figura No. 3.4 se presenta el diagrama de flujo, que ilustra el tren de tratamiento propuesto de las aguas residuales del proceso **kraft**, donde los residuos líquidos procedentes de los diversos procesos de la planta son llevados a la planta de tratamiento primario, donde existe un clarificador primario para la remoción de los sólidos suspendidos. Las fibras son llevadas a la superficie del agua con la ayuda de burbujas de aire inyectadas en el fondo y retiradas por rebalse a través de los bordes superiores de la piscina, uno de los equipos más utilizados es el DAF (Disolved Air Flotation), que llega a tener un 98% de remoción.

Los sólidos más pesados, una vez decantados, son retirados desde el fondo por rastrillos rotatorios, los que posteriormente, junto con las fibras, son prensados para retirarle el agua excedente y los sólidos se depositan en vertederos especialmente habilitados o se queman en calderas de poder.

El efluente prosigue a una etapa de neutralización, donde se le agregan aditivos químicos neutralizantes para que los residuos finales no sean ácidos ni alcalinos.

Una vez neutralizado, el efluente esta en condiciones para eliminarle el color, antes de pasar al tratamiento secundario (lodos activados), esto es recomendable ya que en ocasiones el color afecta el buen funcionamiento de los microorganismos. En este caso el método elegido es coagulación por cal, ya que tiene ventajas económicas, además de un 85-93% de remoción.

El efluente continúa con un tratamiento secundario para la eliminación de la materia orgánica (DBO y DQO), en este caso la elección fueron los lodos activados, debido a que en la actualidad son los más aplicados a nivel mundial, además es simple de operar y requiere poca atención. Se llega a obtener una eficiencia del 80-90% de eliminación de materia orgánica.

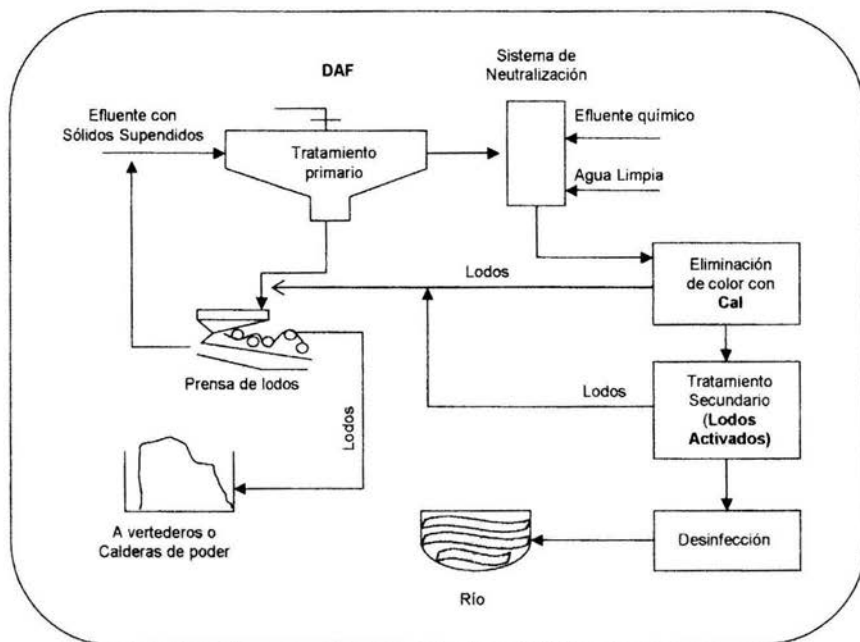


Fig. 3.4 Tratamiento de efluentes del proceso Kraft

Finalmente el efluente pasa a la etapa de desinfección con el objetivo de destruir todo tipo de organismos que pudiera contener, esto se lleva a cabo para evitar las posibles enfermedades en el hombre. El método que generalmente se utiliza, es el de la cloración,

sin embargo empieza a tener un surgimiento el método de luz ultravioleta, debido a las ventajas descritas en la tabla No. 3.4.

Una vez realizado el paso de desinfección, el agua tratada puede ser devuelta al río, o bien se puede reutilizar en el proceso como agua fresca.

Los lodos producto del tratamiento Físicoquímico (DAF y Remoción del color) y Biológico o tratamiento secundario (Lodos Activados), son enviados a incineración.

# CAPITULO IV

## Conclusiones.

---

El control de la contaminación del agua ha tenido un fuerte impacto sobre la industria de la pulpa y papel, debido primordialmente a que es una de las principales industrias consumidoras de agua como materia prima y como consecuencia, también es una de las que más contaminan.

Dentro de los procesos para la obtención de pulpa y papel a partir de la madera, el del "sulfato o kraft" es el más difundido a nivel nacional y mundial, debido a su versatilidad en comparación con los demás, para lograr un uso más eficiente de los recursos madereros y a la vez lograr pulpas especiales adecuadas a las exigencias de los mercados en expansión del papel y cartón.

En el proceso kraft el efecto de contaminación de mayor impacto lo representan las áreas de producción y de blanqueo de la pulpa, ya que se generan contaminantes tales como: SST (Sólidos Suspendidos Totales), DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), AOX (Halógenos Orgánicos Absorbibles), color, pH, y otros en menor grado, todos ellos ocasionan serias y variadas alteraciones que implican un gran efecto negativo en la calidad de los cuerpos receptores y como resultado en la vida acuática.

Las mejoras tecnológicas registradas en esta industria se han desarrollado en el área de aumento en la eficiencia de los procesos productivos y a sus eficientes programas de uso adecuado del agua y prevención de la contaminación, algunas de estas mejoras son las siguientes:

En los procesos de blanqueo, las mejoras han significado en la mayoría de las fábricas que las aplican la total eliminación del proceso de blanqueo basado en cloro elemental, reemplazándose con el sistema de blanqueo ECF (Elemental Chlorine Free) o TCF (Totally Chlorine Free), el proceso ECF ha significado una reducción de residuos de compuestos clorados en más de un 90% / tonelada con respecto al proceso original.

El consumo de agua en los procesos productivos ha disminuido en forma importante, esto ha permitido que hoy en día se consuman aproximadamente 40m<sup>3</sup> por tonelada de

celulosa producida, en comparación con los 120-140m<sup>3</sup> de agua utilizada en los años 80's, esto es consecuencia de las mejoras de eficiencia que han permitido cerrar el circuito, es decir reutilizar en mayor grado el agua consumida. Esto ha significado que en la actualidad cerca de un 95% de agua usada en los procesos sean tratadas y vueltas a utilizar, así como también se tratan antes de devolverlos a los cursos fluviales.

Con respecto al cierre de los circuitos de aguas, estos conllevan a las siguientes ventajas; menor costo de agua de alimentación, menor costo en el tratamiento de efluentes, menor pérdida de fibras, finos y cargas, menor impacto sobre el medio ambiente debido a una menor necesidad de recursos naturales; pero también tiene algunas desventajas importantes como el aumento de la SST, DBO, DQO, con el lógico deterioro del producto final, por tal motivo uno de los objetivos y metas más importantes a este respecto es obviamente el reciclo razonable de circuitos de agua, lo cual no significa el cierre completo, sino encontrar el equilibrio entre la alta calidad del producto, el buen funcionamiento de las máquinas y la calidad del agua de proceso estable con la mejor y más competitiva tecnología disponible al seleccionar los equipos. Esto nos llevará en definitiva a reciclar todo aquel material útil de nuevo al proceso de fabricación y reutilizar el agua en la recirculación de las aguas de proceso, obteniendo todo tipo de ahorros.

Los sistemas de tratamiento de efluentes de una planta de celulosa y papel son en general bastante eficientes en la remoción de los principales contaminantes, estos sistemas constan de un proceso primario, que en el presente trabajo se consideró un FAD seguido de un sistema para neutralizar, después la eliminación del color a través de un tratamiento de coagulación de cal, y un tratamiento secundario que en este caso fue lodos activados para eliminar la materia orgánica, y finalmente se aplicó un tratamiento de desinfección. La correcta aplicación de este tren de tratamiento para las aguas residuales del proceso kraft, nos garantiza el poder verter los efluentes al cuerpo receptor sin ningún problema y con la seguridad de cumplir con las NOM's, establecidas.



# CAPITULO V

## Bibliografía.

---

1.- "La contaminación ambiental en México causas efectos y tecnología"

Blanca E. Jiménez Cisneros

2° impresión, Ed. Limusa

México D.F. 2001

2.- "Depuración de aguas residuales"

Aurelio Hernández Muñoz

Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos,

2° edición, Ed. Paraninfo

España Madrid. 1992

3.- "Fundamentos de control de la calidad del agua"

THY Tebbutt

3° impresión, Ed. Limusa

México, D.F. 1995

4.- "Ingeniería ambiental contaminación y tratamientos"

Ramón Sans Fonfria

Ed. Marcombo

España, Madrid. 1989

5.- "Manual de aguas para usos industriales"

ASTM (American Society for Testing and Materials)

3° edición, Ed. Limusa

Philadelfia, Pennsylvania. 1982

6.- "Calidad del agua"

Jairo Alberto Romero Rojas

Ed. Alfa-Omega

México, D.F. 1999

- 7.- "Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones"  
Frank N. Kemmer & John McCallion, Nalco Chemical Company  
Tomo I y II , Ed. Mc. Graw Hill. 1996.
- 8.- "Tratamiento de aguas industriales"  
Miguel Rigola Lapeña  
Ed. Alfa-Omega  
Barcelona, España. 1999.
- 9.- "Tratamiento y depuración de las aguas residuales"  
Metcalf-Eddy  
2° edición, Ed. Mac Graw Hill.  
Barcelona, España. 1981.
- 10.- "Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel"  
C. Earl Libby  
Décima Impresión, Tomo I y II, Ed. Continental.  
España. 1984
- 11.- "Manual de Procesos Químicos en la Industria"  
George T. Austin  
5° edición, Tomo III, Ed. Mc. Graw Hill  
México, D.F. 1988.
- 12.- "Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental"  
Mariano Seoanez Calvo  
2° edición, Ediciones Mundi-prensa.  
Madrid, Barcelona, España, 1999.
- 13.- "Tratamiento biológico de las aguas de desecho"  
Winkler Michael A.  
4° Impresión, Ed. Limusa.  
México, D.F. 1996.

- 14.- "Pulpa y papel, química y tecnología química"  
James P. Casey (Compilador)  
Vol. I y II, Ed. Limusa.  
México, D.F. 1990.
- 15.- "Manual de Riegel de Química Industrial"  
James A. Kent.  
7° Edición, Ed. Continental  
México, D.F. 1984.
- 16.- "Water Quality and Treatment"  
American Water Works Association  
Frederick W. Pontius  
4° Edición, Ed. Mc. Graw Hill  
1990.
- 17.- "Industrial Water Conditioning"  
Betz  
9° Edición  
1991.
- 18.- "Tratamiento de aguas residuales"  
R.S. Ramalho  
Ed. Reverte  
1996.
- 19.- "Control de calidad y tratamiento del agua"  
Manual de abastecimientos públicos de aguas  
AWWA. The American Water Works Association Inc  
Madrid, España. 1975.
- 20.- [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- 21.- [www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx)

22.- [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)

23.- [www.economia.gob.mx](http://www.economia.gob.mx)

24.- [www.cnicip.org.mx](http://www.cnicip.org.mx)

25.- [www.kurita.com.mx](http://www.kurita.com.mx)

26.- [www.papelnet.com](http://www.papelnet.com)

27.- [www.avantel.com](http://www.avantel.com)

28.- [www.celulosa.com](http://www.celulosa.com)

29.- [www.lenntech.com](http://www.lenntech.com)

AOX: Halógenos Orgánicos Absorbibles, mide la concentración de compuestos orgánicos clorados.

Celulosa: Material fibroso que es el principal componente de la pared celular de todas las maderas, pajas, pastos, etc.

Consistencia: Es el porcentaje, en peso, de fibra en cualquier combinación de fibra y agua. Puede expresarse en términos de porcentaje sobre fibra seca a la estufa o seca al aire.

Coagulación: Se utiliza para separar los materiales finos en suspensión y el color. La adición de coagulantes, tales como el sulfato de aluminio, sulfato ferroso, cal, aluminato de sodio y cloruro férrico, forma un precipitado gelatinoso que absorbe o enmaraña al material suspendido o al color y luego coalesce en partículas gruesas conocidas con el nombre de *flóculo*. El flóculo se asienta de manera relativamente rápida, arrastrando con él las impurezas en suspensión y puede ser separado por asentamiento o filtración.

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno, mide el grado en que el material biológico consume el oxígeno disuelto en las aguas de descarga. Usualmente es medido después de 5 días, por lo que se conoce como DBO<sub>5</sub>. Los resultados de esta prueba son utilizados para: determinar la cantidad aproximada de oxígeno requerida para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente, y para medir la eficiencia de ciertos procesos de tratamiento.

DQO: Demanda química de oxígeno, esta prueba tiene por objeto medir el contenido de materia orgánica de aguas residuales e industriales. El equivalente en oxígeno requerido para poder oxidar la materia biodegradable y no biodegradable, se obtiene por medio del uso de agentes oxidantes en medio ácido. (dicromato de potasio/ácido sulfúrico).

TSS: Sólidos suspendidos totales. Son aquellos que quedan retenidos al filtrar al vacío, siendo orgánicos e inorgánicos.

FAD: Flotación por aire disuelto (Dissolved air flotation). Esta ocurre cuando el aire es inyectado al agua residual la cual está a presión. Al disminuir la presión al agua en el tanque, se desprenden finas burbujas. Algunas aplicaciones son: remoción de sólidos con pobres características de sedimentación, reducción del área requerida para el tratamiento de separación de los sólidos suspendidos, pretratamiento para reducción de contaminantes industriales y/o recuperación de subproductos, Aplicaciones especiales para tratar cargas picos de descargas industriales, concentración de lodos antes de deshidratarlos.

Fibras hv: Son fibras largas obtenidas principalmente de pino. Que no son sujetas de un tratamiento mecánico para la obtención de celulosas.

Fibras cortas: Son aquellas obtenidas de maderas distintas a las coníferas, o de estas si se ha empleado un proceso mecánico para obtener celulosa. Cuando se trate de fibras secundarias (desperdicios de papel) pro regla general se referirá a fibra corta.

Fibras secundarias: Sirven para el reciclaje, y se determinan como todas aquellas fibras que ya han sido sujetas de un proceso de fabricación a papel y que previa su recuperación y clasificación, son nuevamente seleccionadas para reprocesarse y fabricar papel nuevamente. Comprende recortes, raspaduras, hojas rotas, periódicos impresos, papel periódico sin impresión, publicaciones, pruebas de imprenta y artículos similares, susceptibles de repulparse.

Filtración: Es un proceso de purificación adicional del agua después que la coagulación y el asentamiento han separado la mayor parte de la materia suspendida y del color, y se lleva a cabo pasando el agua a través de arena en cualquiera de dos tipos de filtros. El filtro de gravedad es un tanque abierto, con un lecho de arena en el cual el agua fluye por gravedad. El filtro de presión utiliza el mismo principio excepto que se emplean tanques cerrados y que el agua se bombea a presión a través de la unidad.

Flotación: La flotación se utiliza para separar partículas líquidas y sólidas del agua residual. Cuando las partículas son muy pequeñas y de baja densidad (cercana a la del agua) flotan en el agua y, en consecuencia, se pueden recoger superficialmente. Los sólidos se separan introduciendo burbujas de aire en el agua, las burbujas se adhieren a

las partículas sólidas en suspensión haciendo que asciendan a la superficie, donde puede ser colectado y removido.

Kraft: Cajas cartón con o sin impresión, corrugado nuevas o usadas, así como papel para fabricación de éstas.

Licor blanco: Corresponde a una solución alcalina usada en la cocción de la madera del proceso kraft. Su composición esta basada en sosa cáustica (NaOH) y sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>S).

Licor negro: Corresponde a la solución a la salida del proceso kraft de cocción de la madera. Su composición contiene variados derivados de la madera como la lignina, cenizas, fibras degradadas disueltas en el licor blanco.

Licor verde: Corresponde a la solución compuesta por agua con sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>S) y carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), ambos provenientes de las cenizas de la combustión del licor negro en la caldera recuperadora.

Lignina: polímero aromático, amorfo y altamente condensado, que representa entre el 20 y 30% en peso de la madera.

Pasta: Mezcla de materiales fibrosos y no fibrosos, en suspensión y solución acuosa, en las proporciones adecuadas que se utilizan para la fabricación del papel. Este término también se usa en el sentido literal de la acción de mezclar los mencionados materiales.

Pasta química de madera al sulfato: Se obtiene por cocción de la madera, generalmente en trozos pequeños, en disoluciones fuertemente alcalinas, puede ser sosa cáustica. La pasta al sulfato es la más importante hoy en día. Se utiliza en la fabricación de productos absorbentes (materias de relleno, pañales para bebe), así como para papeles y cartones muy sólidos que necesitan una resistencia elevada al desgarre, a la tracción y al estallido.

pH: Potencial de hidrógeno, es la intensidad de acidez o alcalinidad de una muestra, y el pH mide realmente la concentración de iones hidrógeno presentes, deberá aproximarse a neutro (7).



Pulpa: La pulpa o fibra o material intermedio, como algunas veces se le llama en la industria del papel, es el material fibroso preparado y listo para el proceso de preparación de la pasta puede ser sin blanquear o blanqueado, en forma de hojas o rollos secos, de paquetes húmedos, a granel o cualquier otra forma apropiada para fines comerciales.

Pulpeo: En la línea divisoria que existe entre la fabricación de la pulpa y el batido, esta el proceso de pulpeo, también conocido como proceso de rompimiento, desintegración o simplemente de suspensión. El proceso consiste en reducir el material seco a forma de pulpa, agregando la cantidad suficiente de agua para adaptarlo al proceso y liberarlo del exceso de fibras u otros materiales no desmenuzados. En el proceso de pulpeo se logra un grado aceptable de separación de fibras. De hecho algunas veces la separación de las fibras se completa en esta etapa. De este modo la fibra se pone en suspensión y puede ser convenientemente transportada por bombeo.

Refinación: La refinación, es también un proceso mecánico al cual se sujetan las fibras, algunas veces después del batido o a veces independientemente de él. En la refinación, las fibras se "peinan" y con frecuencia se reducen de longitud por corte, con objeto de adaptarlas mejor para la formación de la máquina de papel o de cartón. Si bien, por lo general, es un proceso continuo, la refinación también puede efectuarse por métodos intermitentes.

Sedimentación: Es un proceso que consiste en dejar que el agua superficial se mueva muy lentamente a través de un tanque o recipiente largo y derrame por el extremo opuesto para usarse inmediatamente o para seguir procesando. Las partículas gruesas se asientan hacia el fondo del tanque. Se eliminan enjuagando y drenando el tanque. La mayoría de las unidades sedimentadoras están equipadas con dispositivos para la continua separación de la materia asentada.

Suspensión fibrosa: Este es un término que se utiliza frecuentemente en lugar de pulpa o material intermedio, este término en general se restringe al material que ha sido diluido a la consistencia apropiada y que esta en proceso de preparación para la fabricación de papel.