



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

**Cálculo de un púlper y sus instalaciones
complementarias en una fábrica de papel**

Autor:

Mario Martínez Merino

Tutor:

**M^a del Rosario Patiño Molina
Departamento de Química
Orgánica**

Valladolid, Julio de 2017

Agradecimientos

Quisiera aprovechar esta oportunidad para dar las gracias a todos aquellos que han colaborado de forma directa e indirecta para que todo esto sea posible.

En primer lugar, agradecer a mi familia quienes me educaron y han sido un ejemplo de esfuerzo y sacrificio para mí. También por darme la oportunidad de estudiar este grado en ingeniería que culmina con este trabajo, sin ellos, hubiera sido imposible todo esto.

A mis amigos de Cuéllar y de la R.U. Blanca de Castilla, y a mis amigos y compañeros que me han acompañado todos estos años de carrera, con todos ellos he vivido momentos inolvidables.

Por último, me gustaría dedicar unas palabras de agradecimiento a Charo, por hacer de este trabajo un agradable proceso de aprendizaje, a la empresa Voith Paper, Copasa y a Antonio Luis Torre profesor de la UPC, por la ayuda prestada.



Resumen:

El presente trabajo de fin de grado tiene como objetivos, un estudio de la viabilidad técnica y económica de la implantación de un púlper como alternativa a otro púlper ya existente de tecnología obsoleta de manejo muy manual.

Se pretende el diseño de un púlper vertical de baja consistencia, para tratar 250 toneladas diarias de papel reciclado en una fábrica de papel incluyendo un análisis económico para ver la viabilidad del proyecto.

Proceso de pulpeado de papel reciclado o papelote reciclado para su posterior utilización en la fábrica de papel, así como el proceso global de fabricación de papel a partir de diferentes materias primas.

Producción de pulpa y papel, centrándose en la producción de papel a partir de papel reciclado, ya que es el método predominante actualmente.

Palabras clave:

Púlper; papel reciclado; pasta de papel; trommel; hélice.

Abstract:

This end of degree project aims at studying the technical and economical viability related to the implementation of a pulper as an alternative to another already existing one, which is out-dated and has to be handled manually.

The main goal is associated with the designing of a low-consistency vertical pulper, which is going to be used to treat 250 tons of recycled paper each day at a paper mill, including an economic analysis to assess the project's viability.

Pulping process of recycling paper aiming to using it later at the paper mill, as well as the global paper-making process from different raw materials.

Production of pulp and paper, focusing on the production of paper from recycled paper, as it is the main method used nowadays.

Keywords:

Pulper; recycled paper; paper pulp; trommel; propeller.



Nomenclatura de la industria papelera

Antes de comenzar la memoria se definirán una serie de términos propios de la industria papelera que aparecen a lo largo de dicha memoria:

- **Pasta:** este término puede hacer referencia a dos cosas, por un lado, se refiere a la pulpa, fibra o material intermedio dentro del proceso de pastado. Por otro lado, es la mezcla, en diferentes proporciones, de materiales fibrosos que se alimentan a la máquina de papel, tras varios procesos de preparación y depuración, en resumen, es la materia que da origen a la formación de la hoja de papel.
- **Consistencia:** es el porcentaje en peso, de la fibra en una mezcla de fibra y agua.
- **Cargas:** sustancias químicas, como carbonato cálcico, almidón etc, que se aportan a la fibra en unas proporciones previamente calculadas, para mejorar las características finales del papel.
- **Finos:** sustancias de tamaño muy pequeño, como pueden ser restos de fibras y elementos constituyentes de estos.
- **Foils:** piezas, generalmente de plástico, que se colocan en la parte inferior de la tela. Tienen un ligero ángulo de descenso que al contacto con la malla generan un cierto vacío.
- **Vacuum foils:** igual que los foils, pero además absorben el agua mediante bombas de vacío.
- **Stickies:** conjunto de elementos pegajosos que están presentes en el papel reciclado y se eliminan en la etapa de destintado.
- **Pulpa química:** pulpa obtenida a partir de madera u otras materias celulósicas de origen vegetal, mediante un tratamiento químico que elimina la mayor parte de los componentes no fibrosos
- **Pulpa kraft:** Variedad de pulpa al sulfato, de elevada resistencia mecánica, utilizada especialmente para fabricar papeles kraft.
- **Papel Kraft:** tipo de papel realizado con pulpa de madera de gran resistencia, que tradicionalmente se ha utilizado en la fabricación de productos para comercio y bolsas de papel para supermercados, farmacias, etc.
- **Pulpa mecánica:** pulpa obtenida a partir de diversas materias primas, pero generalmente de madera, mediante procedimientos totalmente mecánicos.
- **Gramaje o peso base:** medida del peso (expresado en gramos) de un metro cuadrado de papel. Es la propiedad más importante ya



que el papel normalmente es comercializado en base a su Peso Base.

- **Espesor o Calibre:** es la distancia perpendicular entre las 2 caras de una hoja de papel (cada tipo de papel tiene un espesor determinado). Aunque dos papeles tengan el mismo gramaje, no necesariamente presentan el mismo espesor. Se mide en micras.
- **Opacidad:** se determina por la cantidad de luz que atraviesa el papel. Si toda la luz incidente atraviesa por el papel (nada de luz se refleja o absorbe) la opacidad es 0% y el papel es totalmente translucido. Por el contrario, si nada de la luz atraviesa el papel, la opacidad es 100% y el papel es totalmente opaco.
- **Calandrado:** operación de alisado entre cilindros pulidos denominados calandrias; este proceso se lleva a cabo normalmente en el extremo seco de la máquina de papel.
- **Calandria o calandra:** dispositivo utilizado para comprimir papel. Está constituido por varios cilindros fijos superpuestos, uno de los cuales puede ajustarse para cambiar las características del papel modificando el nivel de compresión.
- **Bobinar:** el proceso final en la fabricación del papel; después de pasar a través de los cilindros de secado y, si procede los rodillos de las calandrias.
- **Bobina jumbo:** bobina de papel principal de la que se cortan bobinas o tamaños de hoja más pequeños.
- **Bobinadora (Pope):** Cilindro al final de la máquina de papel que sirve para bobinar el Rollo Jumbo.



ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: MEMORIA	11
1. Introducción y justificación del proyecto	17
2. Antecedentes.....	18
3. Producción de papel.....	26
4. Producción de papel reciclado	137
CAPÍTULO II: CALCULOS.....	217
1. Volumen del púlper.....	221
2. Espesor	223
3. Rotor	232
4. Motor.....	234
5. Correas y poleas	236
6. Eje principal	243
7. Rodamientos.....	256
CAPÍTULO III: ESTUDIO ECONÓMICO.....	267
1. Introducción al estudio económico	273
2. Presupuesto.....	273
3. Financiación.....	274
4. Ahorros.....	276
5. Viabilidad económica del proyecto.....	277
CAPÍTULO IV: PLIEGO DE CONDICIONES.....	283
CAPÍTULO V: SEGURIDAD.....	319
1. Almacenamiento de materias primas y productos finales.....	325
2. Equipos y máquinas.....	344
3. Zona de pulpeado.....	371
4. Plan de emergencias	377



CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	385
1. Conclusiones.....	387
2. Trabajos futuros.....	387
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA.....	389
1. Bibliografía.....	391
2. Webgrafía.....	394
CAPÍTULO VIII: ANEXOS	395
Anexo I: Clasificación de los procesos de producción de pulpa de madera	397
Anexo II: Calidades normalizadas de papel y cartón recuperado	401
CAPÍTULO IX: PLANOS.....	409



CAPÍTULO I

MEMORIA



ÍNDICE

1. Introducción y justificación del proyecto	17
1.1. Descripción	17
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivos	18
2. Antecedentes	18
2.1. Historia del papel	18
2.2. Situación actual de la Industria Papelera.....	20
2.3. Situación actual de la Industria Papelera en España	21
2.4. Situación del reciclaje de papel	21
2.4.1. Tasas de reciclado	23
3. Producción de papel	26
3.1. Resumen	26
3.2. Materias Primas	30
3.2.1. Madera.....	30
3.2.2. Otras fibras vegetales no maderables.....	32
3.3. Pulpa de Madera	34
3.3.1. Almacenamiento de la madera	34
3.3.2. Descortezado.....	35
3.3.3. Astillado	37
3.3.4. Cernido de la madera	37
3.3.5. Calidad de las astillas	37
3.4. Producción de pulpa	39
3.4.1. Producción de pulpa con refinador mecánico	39
3.4.2. Producción de pulpa semiquímica: proceso al sulfito neutro o NSSC 40	
3.4.3. Producción de pulpa al sulfito.....	42
3.4.4. Producción de pulpa alcalina	44
3.4.5. Comparativa de pulpas mecánicas y químicas.....	46
3.5. Blanqueo	48
3.5.1. Blanqueo de las pulpas mecánicas	48



3.5.2.	Blanqueo de pulpas químicas	51
3.6.	Desintegración	54
3.6.1.	Factores que afectan a la desintegración de la pulpa.....	55
3.6.2.	Púlperes	57
3.7.	Refinado	60
3.7.1.	Efectos del refinado.....	63
3.7.2.	Caracterización del refinado	66
3.7.3.	Refinadores.....	76
3.7.4.	Variables en la operación de refinado	80
3.7.5.	Circuitos de refinado	84
3.7.6.	Control del proceso de refinado	86
3.7.7.	Energía en el refinado	89
3.7.8.	Efecto de las condiciones de refinado	91
3.7.9.	Propiedades afectadas por el refinado.....	98
3.8.	Mezcla de aditivos	99
3.8.1.	Aditivos	99
3.8.2.	Auxiliares	100
3.9.	Depuración	101
3.9.1.	Origen y clasificación de las impurezas	101
3.9.2.	Depuradores	102
3.9.3.	Depuración secundaria	104
3.10.	Máquina de papel / Formación de la hoja	105
3.10.1.	Clasificación de las mesas de fabricación.....	107
3.11.	Prensado en húmedo.....	107
3.11.1.	Fases del prensado	109
3.11.2.	Variables del prensado.....	110
3.11.3.	Tipos de prensas.....	111
3.12.	Secado	113
3.12.1.	Mecanismos de secado	114
3.12.2.	El papel del vapor en el secado.....	115
3.12.3.	Condensados	117
3.13.	Estucado	118



3.13.1. El soporte	120
3.13.2. Salsa de estucado.....	120
3.13.3. Estucadora.....	121
3.13.4. Estucado en máquina	121
3.13.5. Estucado fuera de máquina	122
3.13.6. Variables que intervienen en el estucado	123
3.13.7. Defectos en el estucado	123
3.14. Calandrado.....	124
3.14.1. Tipos de calandrado.....	125
3.14.2. Presión de calandrado.....	126
3.14.3. Características del papel calandrado	127
3.14.4. Defectos producidos en el calandrado.....	127
3.15. Bobinado	128
3.15.1. La Bobinadora	128
3.15.2. Ensayos en la bobina	130
3.15.3. Defectos en el bobinado.....	131
3.16. Cortado	131
3.16.1. Desbobinado	133
3.16.2. Corte.....	134
3.16.3. Detección de defectos	136
3.16.4. Transporte	137
3.16.5. Apilado	137
3.16.6. Operación de Conteo	137
4. Producción de papel reciclado	137
4.1. Introducción	137
4.2. Materia prima	139
4.2.1. Grados de papel recuperado.....	140
4.2.2. Limitaciones de las fibras recicladas	141
4.3. Desintegración o pulpeado.....	145
4.3.1. Equipo utilizado para desintegrar la pulpa	145
4.3.2. Fuerzas que intervienen en la desintegración de la pulpa	152
4.3.3. Evaluación de la desintegración	156



4.3.4.	Tratamiento de los rechazos en púlpers convencionales	159
4.3.5.	Despastillado	160
4.3.6.	Tamizado y depuración	162
4.3.7.	Fraccionamiento	171
4.3.8.	Depuración centrífuga.....	172
4.3.9.	Dispersión y trituración	177
4.4.	Proceso de destintado.....	179
4.4.1.	Flotación.....	182
4.4.2.	Lavado	194
4.4.3.	Productos químicos usados en el destintado.....	195
4.5.	Requerimientos energéticos	199
4.6.	Avances Biotecnológicos	199
4.6.1.	Destintado enzimático	200
4.7.	Gestión ambiental.....	204
4.7.1.	Emisiones al agua	206
4.7.2.	Emisiones a la atmósfera	211
4.7.3.	Residuos sólidos.....	214



1. Introducción y justificación del proyecto

1.1. Descripción

En el presente trabajo de fin de grado se estudia el cálculo de un púlper y sus instalaciones complementarias en una fábrica de papel, con los diversos métodos de producción de pulpa y papel, y el diseño del púlper.

En los antecedentes, se verá la historia y la influencia del papel desde su descubrimiento hasta la actualidad, incluyendo la situación del papel y del reciclaje de papel actualmente en nuestro país.

A continuación, en el apartado 3: Producción del papel, se verá la obtención de las materias primas de las diferentes especies de árboles, los tipos de transporte y descortezado más habituales, el astillado y los diferentes tipos de producción de pulpa mecánica, química y químico-mecánica. Una vez obtenida la pulpa veremos los métodos de blanqueo para las distintas pulpas existentes, así como los procesos de desintegración y refinado. Para terminar el proceso se verán los aditivos empleados, la depuración de impurezas y la formación de la hoja en la máquina de papel, incluyendo los procesos de prensado, secado, estucado, calandrado bobinado y corte de papel.

En el apartado 4, de manera especial se hará hincapié en la producción de papel a partir de papel reciclado o papelote, ya que es el método predominante actualmente. También se estudiarán los equipos utilizados y las diferencias en cuanto a los procesos de desintegración y refinado respecto a los métodos más antiguos de producción de papel vistos en el apartado 3, también se incluirá el necesario proceso de destintado del papelote.

Posteriormente, se diseñará un púlper vertical para tratar 250 toneladas diarias de papel reciclado. Se realizarán los cálculos de una manera pormenorizada referidos al diseño e implantación de la alternativa de ahorro seleccionada. Por último, se realizará un estudio económico y presupuesto para ver la viabilidad del proyecto.

1.2. Justificación

El papel es un elemento que ha acompañado el desarrollo de las sociedades desde su descubrimiento. En un principio su uso fue reducido,



sin embargo, su uso se ha multiplicado exponencialmente debido al descubrimiento de la imprenta y al crecimiento de la población, esto ha provocado que sea insostenible seguir obteniendo el papel de la madera de los árboles.

Cada año desaparecen entre 74.000 y 93.000 km² de selvas en el mundo, un territorio similar al de un país como Portugal. Si se acota el período, las cifras son aún más contundentes, los árboles talados cada minuto ocupan un terreno comparable al de 36 campos de fútbol.

Desde hace años la sociedad está concienciada con esta problemática y con la importancia del reciclaje, ahora bien, son necesarias fábricas donde transformar estas toneladas de papel usado en un papel potencial para reutilizar en múltiples aplicaciones. Este trabajo se centra en el diseño de uno de los equipos utilizados en este proceso para reemplazar uno ya obsoleto que supone un mayor consumo energético.

1.3. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo de fin de grado son los siguientes:

- Realizar el diseño un púlper vertical de baja consistencia, para tratar 250 toneladas diarias de papel reciclado en una fábrica de papel.
- Estudio de la viabilidad técnica y económica de la implantación de un púlper como alternativa a otro púlper ya existente de tecnología obsoleta de manejo muy manual.
- Ofrecer toda la información necesaria para comprender el proceso de pulpeado de papel reciclado o papelote reciclado para su posterior utilización en la fábrica de papel, así como el proceso global de fabricación de papel a partir de diferentes materias primas.

2. Antecedentes

2.1. Historia del papel

La historia del papel se remonta hasta Egipto, donde la escritura se realizaba en papiros. Fue el primer material que presentaba las propiedades asociadas al papel.

El papiro tenía algunos defectos, como que no era demasiado resistente y que con el paso del tiempo se volvía quebradizo (los papiros egipcios que

conservamos han llegado a nosotros gracias a las excepcionales condiciones climáticas de Egipto, la mayoría de los papiros romanos o medievales se han perdido).

En la Edad Media, en Europa se extendió el uso del pergamino. Este material puede fabricarse con la piel de cualquier mamífero con pelo, se fabricó principalmente con la piel de cordero, ternero o cabra. Las limitaciones del pergamino eran numerosas, desde imperfecciones en el pergamino que daban lugar a roturas después del proceso de tensado, hasta imperfecciones propias de la piel del animal como pueden ser cicatrices o manchas, pero la principal limitación era que era un proceso costoso lo que llevó a reescribir gran parte de estos pergaminos.



Figura 1.2.1: Papel de papiro



Figura 1.2.2: Papel de pergamino

La invención del papel como tal, con propiedades similares a las del papel actual se le atribuyen a Cai Lun (consejero imperial del emperador He de Han) en el año 105 d.C.

Cai Lun empezó a utilizar corteza de árboles, cañamos, trapos de tela y descartes de redes de pesca como materia prima para hacer papel. Estas materias primas eran trituradas y luego sumergidas en agua durante un largo periodo de tiempo. Después las mezclas se hacían pasta que se calentaba y extendía en rebanadas delgadas. Dejando secar esta pasta al sol se convirtió en papel que era adecuado para escribir. Cai Lun presentó al emperador el papel que hizo, quien se mostró muy satisfecho y emitió un edicto imperial ordenando que el papel y el proceso de su fabricación fueran ampliamente adoptados alrededor de China. En consecuencia, la civilización China se desarrolló rápidamente con la literatura.

En el siglo VIII, China exportó papel a otros países de Asia, pero el secreto de la técnica de la fabricación se mantuvo estrictamente durante siglos.



En el año 795 se abrió una fábrica de papel en Bagdad y, gradualmente, se extendió en el mundo árabe.

Los árabes llevaron este conocimiento a España, estableciéndose el primer taller en Córdoba en el año 1136, a partir de este momento la técnica fue difundida a lo largo del continente y aparecieron molinos papeleros al poco tiempo en países como Holanda, Italia o Francia. La producción de papel fue introducida en América por los españoles alrededor de 1580.

En 1840 se introdujo el proceso mecánico de trituración de madera y 10 años después se introdujo el primer proceso químico.

2.2. Situación actual de la Industria Papelera

La fabricación de papel y derivados del papel alcanza cifras que sitúan esta industria entre las más grandes del mundo. Hay fábricas en más de 100 países repartidos por todo el mundo, con más de 3,5 millones de personas directamente empleadas.

Los mayores productores papel y pasta a nivel global son Estados Unidos, Canadá, Japón, China, Finlandia, Suecia, Alemania, Brasil y Francia.

Una de las características que tiene esta industria es que todos los países son consumidores. La producción mundial de pasta, papel y cartón fue de unos 400 millones de toneladas en 1993. A pesar de las predicciones de disminución del consumo de papel ante el auge de la era electrónica, desde 1980 se observa un crecimiento aproximadamente constante de la tasa anual de producción del 2,5 %.

La principal fuente de fibra para la producción de pasta en este siglo ha sido la madera. Debido al hecho de que las regiones forestales de donde se obtiene la materia prima tienen por norma general una densidad de población baja, tiende a producirse una dicotomía entre las zonas de producción y las de utilización.

No obstante, la presión ejercida por los grupos ecologistas para la conservación de los recursos forestales, manifestada en la defensa del empleo de papel reciclado, de cultivos agrícolas y de bosques de plantación de rápida rotación como fuentes de la materia prima, puede modificar la distribución de las instalaciones de producción de pasta y papel en todo el mundo en las próximas décadas.



2.3. Situación actual de la Industria Papelera en España

La industria papelera en nuestro país se ha visto afectada en los últimos años por la crisis económica y el crecimiento exponencial de los formatos electrónicos frente al papel escrito, cerrando entre los años 2007 y 2010, 34 fábricas dedicadas a la fabricación de papel y 3 dedicadas a la fabricación de celulosa.

A pesar de estos malos datos, en el año 2010 en España existían 85 fábricas dedicadas a la producción de papel y celulosa, y actualmente España es el tercer país de la Unión Europea en superficie forestal (por detrás de Suecia y Finlandia), con 487.500 hectáreas (el 2,7% de la superficie forestal total) dedicada a las plantaciones para producir papel. Además, España es el segundo país de la Unión Europea (por detrás de Alemania), en volumen de papel reciclado, reciclando más del 70% del papel y cartón utilizado.

La industria papelera utiliza más de 6 millones de m³ de madera de plantaciones de pino y eucalipto, de los cuales el 83% procede de plantaciones locales. Estas plantaciones proporcionan empleo directo a casi 6.000 personas, y empleo indirecto (transporte, talleres, maquinaria etc.) a casi 20.000 trabajadores.

El sector papelero es el mayor productor y utilizador de energía renovable procedente de la biomasa de todos los sectores industriales en España. En el año 2012 el sector papelero tenía una potencia instalada en cogeneración de 1.135MW, el 37% del combustible total empleado provenía de la biomasa.

Por último, resaltar la mejora en la eficiencia de la valorización de los residuos del proceso (se valorizan el 77% de los residuos de fabricación) y del uso del agua en el sector, donde ahora mismo se utiliza la mitad de agua que hace 20 años mientras que la producción de celulosa y papel se ha duplicado.

2.4. Situación del reciclaje de papel

Las fibras recicladas constituyen una materia prima que ha crecido exponencialmente. Se ha pasado de tener un 20% de fibras recicladas en la composición de las suspensiones papeleras en los años 70 a más de un 40% en la actualidad. Esto ha convertido el reciclado en un subsector muy



importante desde un punto de vista económico, social y medioambiental, dentro del sector de la industria papelera.

El reciclado de papel y cartón evita que este se acumule en los vertederos ocupando grandes volúmenes que llegarían a ser insostenibles. Por ejemplo, en Estados Unidos, donde el reciclado de papel no es una actividad tan desarrollada como en los países europeos, aproximadamente el 50% de las basuras están constituidas por papel y cartón.

En la Unión Europea, para paliar este efecto medioambiental y la creciente necesidad de biocombustibles, se ha planteado la incineración de papel reciclado como complemento para obtener energía. La obtención de energía a partir de biocombustibles pasaría por la conversión de la madera en carbón vegetal, como se está planteando en Brasil. Actualmente, más de un 50% de la madera talada en el mundo se utiliza como combustible y solamente un 10% como fuente de fibras para la producción de papel y cartón.

A pesar del reciclado, el papel continúa teniendo un cierto impacto ambiental. Primeramente, debido a la imposibilidad de reciclar la totalidad del papel consumido. Algunos tipos de papel, como puede ser el caso de libros, papel higiénico, cigarrillos, o papel muy contaminado, no es posible recuperarlos, y por tanto, reciclarlos.

Estos tipos de papeles equivalen al 20% del papel consumido. Además, aproximadamente otro 15% del papel consumido no es reciclado. Todo esto sitúa los límites actuales del reciclado aproximadamente en un 65% del papel consumido. Esto quiere decir, que alrededor del 35% del papel y cartón consumido genera un impacto ambiental y propicia la incorporación de fibras vírgenes procedentes de la tala de bosques y plantaciones forestales.

Además, la transformación del papel recuperado en nuevos productos genera residuos, tanto en procesos de destintado como sin destintado. Alrededor de un 15% del material se pierde, por ello actualmente se está trabajando en la disminución de las pérdidas, recuperando algunos de sus componentes, fibras, finos y cargas, que en algunos casos como pigmentos de estucado pueden suponer un valor añadido importante. El resto de contaminantes, tintas, tensioactivos, plásticos, metálicos y stickies, pueden ser tratados en sistemas de depuración internos y externos convencionales, yendo a parar los residuos a vertederos controlados e incineración. Esto conlleva un impacto ambiental muy leve debido a su reducido volumen.



Aparte de las aportaciones de fibra virgen a causa de las dificultades de recolección y pérdidas en la transformación, hay que tener en cuenta que solamente son posibles de 4 a 6 ciclos de reciclado, ya que por diferentes factores del proceso de producción del papel y cartón reciclado la fibra va perdiendo propiedades conforme aumentan los ciclos de reciclado. Como resultado, el sistema de producción requiere un aporte constante de fibras vírgenes continuo. Por lo tanto, aparte de su importancia económica, social y ambiental, el reciclado modera el consumo de los recursos forestales destinados a la industria papelera, contribuyendo favorablemente al desarrollo sostenible.

A todas estas ventajas hay que incluir que el proceso de transformación del papel reciclado en nuevo papel o cartón es un proceso más sostenible, ya que tanto el consumo de agua y energía son bastante menores que en los procesos convencionales de obtención de papel y cartón tal y como vemos en la tabla 2.1.

Tabla I.2.1: Consumo de agua y energía por tonelada de papel producido

Materia Prima	Papel de Calidad Superior	Papel de calidad ordinaria	Papel reciclado
Agua (m ³)	40	15	2
Energía (kw-h)	7600	4750	2750

2.4.1. Tasas de reciclado

El nivel de reciclado de un país o región se mide con las siguientes tasas:

- Tasa de utilización:

$$\frac{\text{Cant. anual de papel y cartón usada como materia prima}}{\text{Cantidad anual de papel y cartón producido}} * 100$$

- Tasa de recolección:

$$\frac{\text{Cantidad anual de papel y cartón recolectado}}{\text{Consumo aparente de papel y cartón}} * 100$$

- Tasa de reciclado:

$$\frac{\text{Cantidad anual de papel y cartón recuperado utilizado}}{\text{Consumo anual de papel y cartón}} * 100$$

En la figura I.2.3 podemos ver las tasas de reciclado en las distintas regiones del planeta en el año 2010.

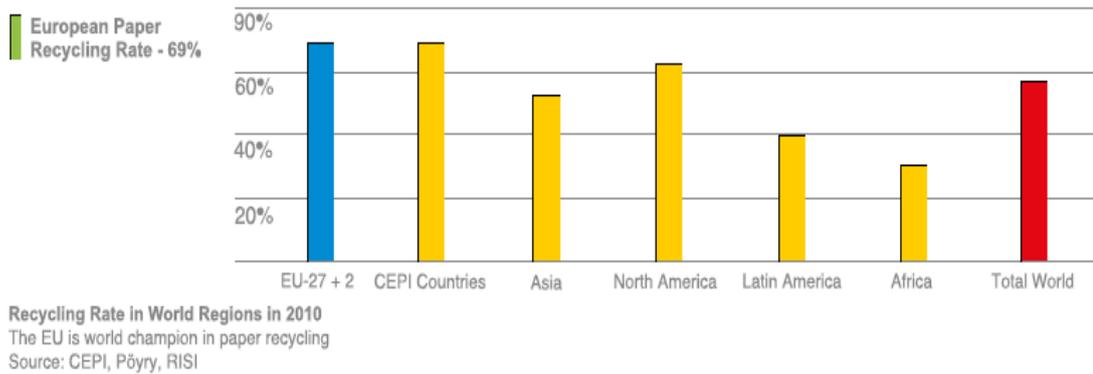


Figura I.2.3: Tasa de reciclaje en las distintas regiones del planeta en 2010

Desde el punto de vista de la Unión Europea:

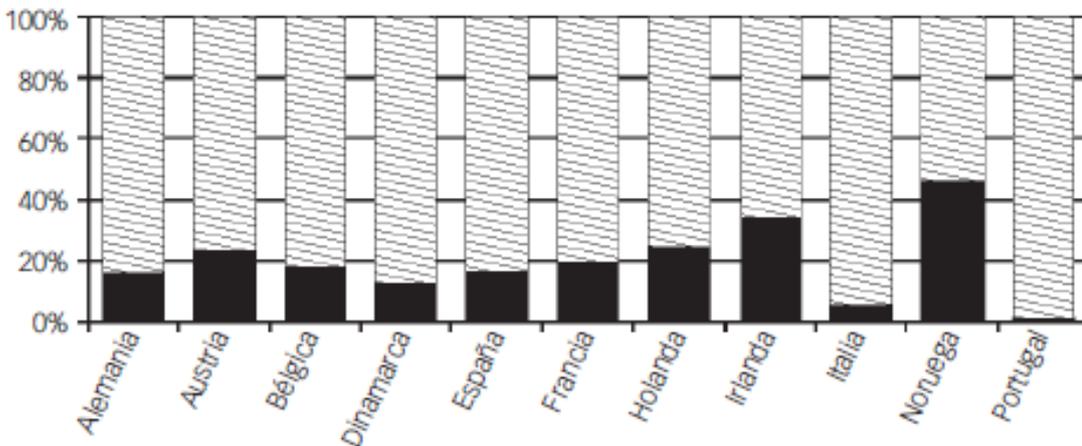


Figura I.2.4: Composición de los residuos municipales en varios países de la Unión Europea.

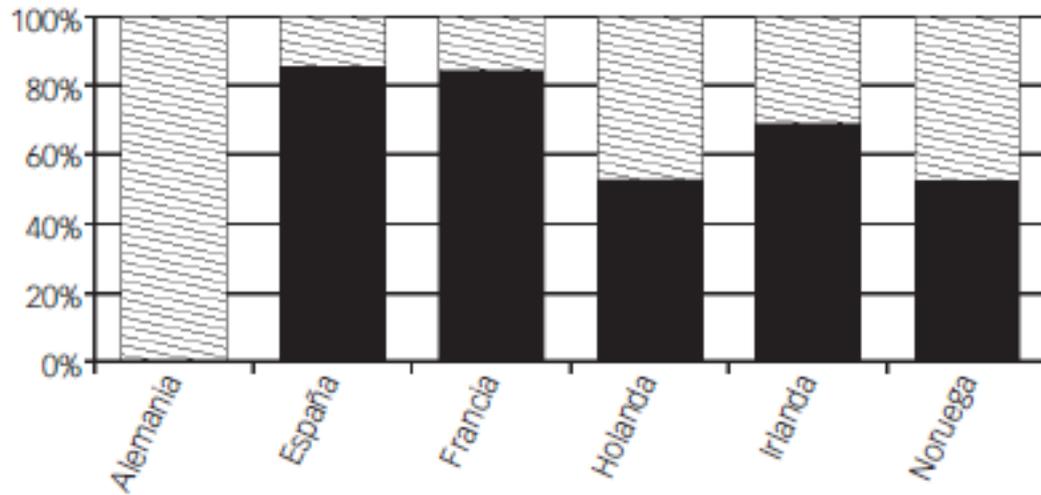


Figura I.2.5: Porcentajes de recogida selectiva del total de residuos papeleros generados en algunos países de la UE

Las fuentes de recogida las podemos ver en la siguiente figura:

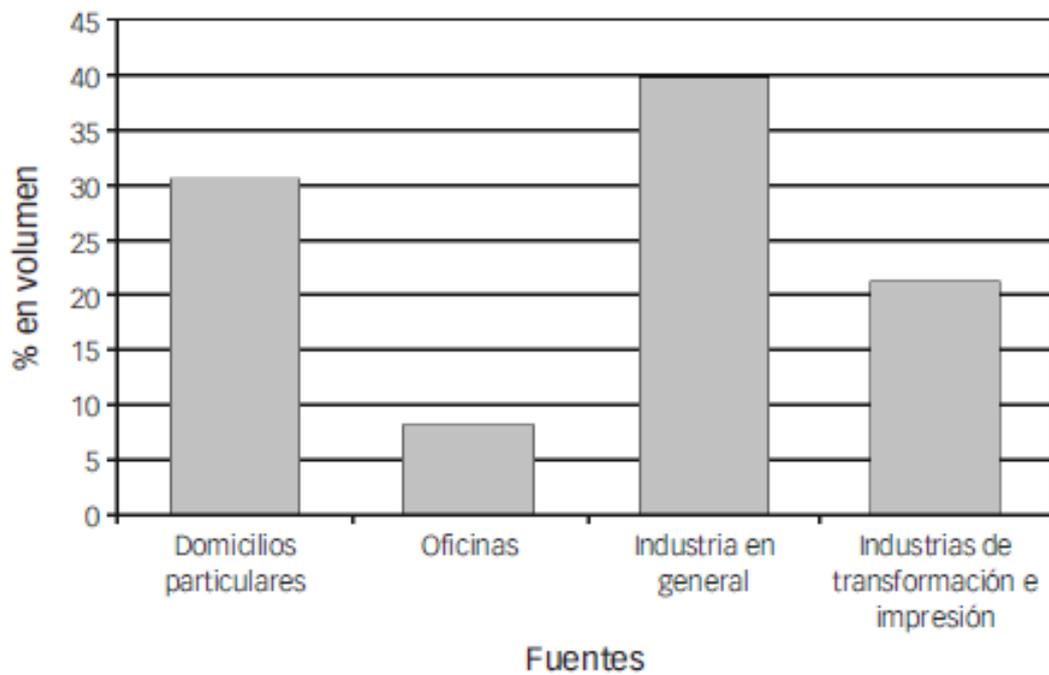


Figura I.2.6: Porcentaje en volumen de residuos papeleros aportados al sistema de reciclado según la fuente.

Los principales usos del papelote recuperado los podemos ver gráficamente en la siguiente figura:

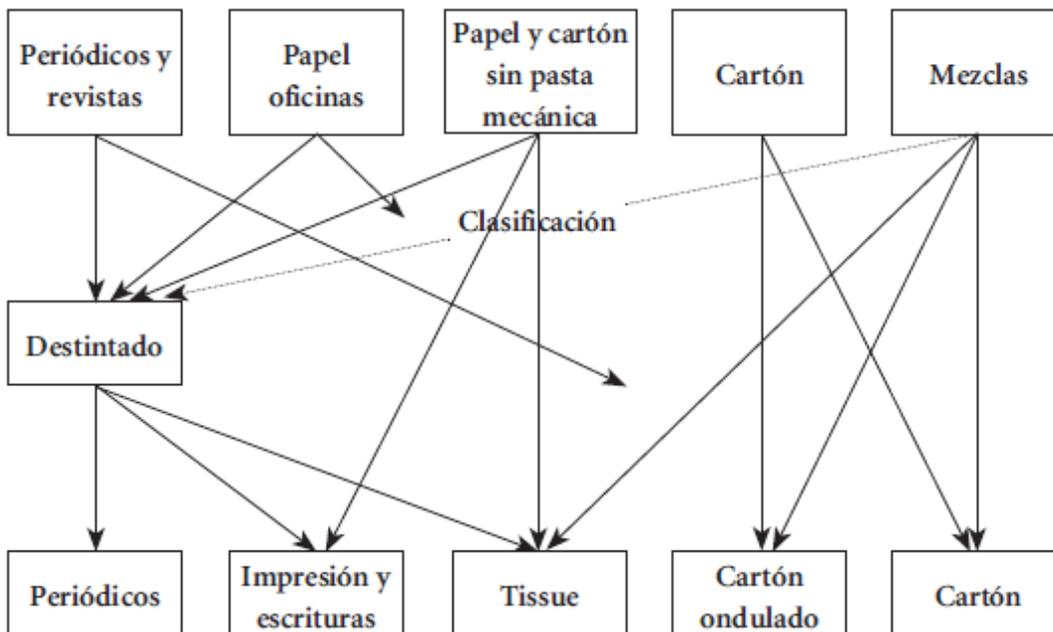


Figura I.2.7: Principales usos del papelote recuperado

3. Producción de papel

En este capítulo, en el primer apartado comenzaremos con un breve resumen del proceso global de fabricación de papel, y en los siguientes apartados desarrollaremos cada una de las fases del proceso de forma que visto el proceso global pueda ser situada cada fase dentro del proceso.

3.1. Resumen

Los árboles son descortezados, este proceso depende del tipo de árbol, por ejemplo, en el caso del pino puede hacerse mecánicamente (esta operación se realiza mediante frotamiento dentro de un tambor y en un medio húmedo) aunque también se puede hacer un descortezado químico, y en otros casos como el eucalipto es necesario un descorchado manual nada más talarlo. La corteza extraída se puede aprovechar quemándola para producir vapor.

Posteriormente se reducen los troncos de los árboles a pequeñas astillas conocidas con el nombre de chips, con ayuda de un cedazo se consigue



un tamaño uniforme en estos chips, ya que las astillas grandes son rechazadas volviendo a pasar por la cuchilla para reducir su tamaño.

La pasta o pulpa se puede obtener por métodos químicos, mecánicos o químico-mecánicos, generalmente se usan métodos químicos, que consisten tratar químicamente la madera en dos fases:

En la primera fase se realiza la cocción alcalina en un cilindro llamado lavadora en la que se pone en contacto la madera con sosa durante varias horas a 158°C. En la caldera de recuperación se quema lignito de madera a 1000°C, algunos productos químicos que salen fundidos en forma de lava se recuperan. Una vez lavada, la pasta marrón se envía al espesante, a continuación, hay que blanquearla.

En la segunda fase, de blanqueo, se mezcla con agua oxigenada y oxígeno (también puede usarse dióxido de cloro). Este tratamiento químico produce la eliminación total de los componentes no celulósicos, principalmente la lignina.

Después se drena parcialmente el agua, un tornillo sin fin separa la pasta para facilitar su bombeo a los depósitos de almacenamiento. El agua se extrae con un sistema de 2 rodillos que se mueven a una velocidad de 1060 metros por minuto, entre la entrada y la salida la concentración del agua en la pasta baja de un 95 a un 5%

A continuación, a partir de la pasta se fabrican hojas de pasta con una humedad del 10%.

Desintegración

La desintegración es la primera etapa que se realiza en una fábrica de papel no integrada. La celulosa llega a la fábrica en hojas que deben deshacerse mediante una operación realizada en el púlper. El objetivo de esta etapa es doble:

Por un lado, la obtención de una suspensión fibrosa que se pueda transportar mediante bombeo a las siguientes etapas del proceso.

Por otro lado, lograr la individualización de las fibras que se encuentran unidas entre sí en la materia prima.

Industrialmente es prácticamente imposible alcanzar la desagregación total de la materia, debido a que el tiempo de trabajo y el consumo energético para alcanzar dicho objetivo es muy elevado, por lo que se admite un pequeño porcentaje de aglomerados de fibras, a lo que se le llama pastillas. En ocasiones se realiza la desintegración en varias etapas, buscando el modo de reducir el tiempo y el consumo energético necesario en la operación global de desintegrado.



Refinado

En esta etapa se modifica mediante la acción de un trabajo mecánico y en presencia de un medio acuoso, la morfología de las fibras y su estructura físico-química. Mediante el refinado la pasta adquiere las aptitudes para producir diversos tipos de papel, las fibras son sometidas a una agitación para conseguir su fibrilación que hará que posteriormente se unan químicamente entre sí.

Una vez completada la mezcla de componentes de papel se envía a una tina de nivel constante, en ella la masa siempre tiene una altura permanente para mantener un caudal de salida constante, a partir de este punto empieza lo que será la fabricación de papel propiamente dicha.

Máquina de papel

El primer paso es transformar un caudal de pasta diluida en una lámina delgada, ancha y uniforme que contenga todos los componentes del papel perfectamente distribuidos y con un caudal regular, este paso se da en la caja de entrada.

La suspensión fibrosa es enviada a la mesa de fabricación sobre una tela sin fin donde se formará la hoja de papel, la tela además del movimiento longitudinal tiene también un movimiento transversal denominado traqueo que tiene la finalidad de orientar las fibras en ambas direcciones del papel y evitar diferencias en las características de este entre el sentido máquina y el transversal.

El sentido máquina recibe también el nombre de dirección de fibra ya que en este sentido se colocan las fibras mayoritariamente, el sentido transversal se conoce también como contrafibra, este aspecto es muy importante ya que el papel presentara un comportamiento diferente en las dos direcciones. El sentido de la fibra del papel ha de tenerse en cuenta tanto en la impresión como en el plegado y la encuadernación.

Cuando la pasta diluida incide en la tela tiene un 99% de agua (se necesita este volumen de agua para evitar la floculación, es decir, la tendencia de las fibras a aglutinarse, ya que sino la hoja de papel presentará una deficiente formación. Al principio el proceso de drenaje es rápido por la gran dilución de la pasta y por efecto de la gravedad, pero luego se forma una capa compacta que hace más difícil la eliminación del agua, por ello se recurre a la acción de los foils y cajas aspirantes, los cuales se colocan escalonadamente en función de lo enérgica que sea su acción de acuerdo con la dificultad de extraer agua de la hoja.



Las prensas están colocadas inmediatamente después de la tela y donde continua por medios mecánicos la eliminación de agua de la hoja de papel, en el prensado se realiza en cierta medida la consolidación de la hoja, es decir, las fibras son forzadas a un contacto íntimo para que luego se desarrollen buenos enlaces.

Una vez que el papel sale de la zona de prensas solamente se puede eliminar el agua residual por calor, esta operación se realiza en la sequería, que normalmente consta de dos partes llamadas primera y segunda sequería, en ella se aplica calor al papel a través de grandes cilindros de un metro y medio de diámetro cuya superficie es calentada por vapor. El papel va tirando de sí mismo, lo que genera unas tensiones entre las fibras denominadas tensiones internas, esto condiciona de manera muy especial la calidad del papel ya que estas tensiones pueden provocar problemas de estabilidad dimensional en la impresión.

Después de que el papel ha pasado por la segunda sequería se enrolla en una máquina llamada pope, a partir de aquí el papel puede seguir 2 caminos:

Si se trata de un papel no estucado pasa directamente a acabados, pero si es un papel estucado pasa a la maquina estucadora.

El estucado consiste en aplicar al papel una especie de pintura denominada salsa que mejorará sus condiciones de impresión. La salsa de estucado que se realiza en una sección de la fábrica denominada cocina estará formada por pigmentos, blanqueantes ópticos y ligantes como el almidón o latex, en la estucadora se aplica la salsa de estuco mediante un rodillo sobre el papel, y posteriormente se iguala y dosifica la capa mediante una lámina de acero.

Para conseguir que la salsa de estuco se seque con mayor rapidez se utilizan infrarrojos que aplican calor sobre el papel.

Cuando el papel sale de la estucadora es mate, para convertirlo en brillante o semimate hay que pasarlo por la calandra. En las calandras se alternan rodillos metálicos (duros), y rodillos de fibras endurecidas (blandos). Al presionar fuertemente el rodillo duro sobre el blando este se deforma en la línea de contacto lo que da lugar a que en esa zona haya un deslizamiento de una superficie respecto a la otra. Como consecuencia de ello el papel se verá sometido a una acción de frote bajo fuerte presión, lo cual origina brillo. Una vez que el papel está acabado pasará por la bobinadora para convertir la bobina jumbo en bobinas más pequeñas que puedan ser enviadas directamente al cliente o ser transformadas en hojas.



La cortadora es la máquina que transforma el papel de bobinas a hojas, tanto las cuchillas de la bobinadora como de la cortadora deben estar en perfectas condiciones para evitar el polvillo que luego podría causar serios problemas en la impresión. Después el papel es embalado y expedido.

3.2. Materias Primas

El tipo de fibra usada para la fabricación de papel varía mucho de un país a otro, no obstante, desde un punto de vista global la madera supone del 85 al 90% de estas materias primas.

3.2.1. Madera

La madera es un material celular y poroso cuyas células presentan una gran diversidad tanto en forma como en tamaño. El conocimiento de la estructura celular de la madera es importante para la producción de pulpa, ya que la madera permanece intacta a nivel atómico durante el proceso, por lo que la estructura de la madera influye en la penetración de los líquidos, afectando a las reacciones que tienen lugar durante el proceso de producción de pulpa.

3.2.1.1. Componentes de la madera:

Para comprender las reacciones químicas producidas en el proceso de obtención de pulpa es necesario hablar en primer lugar del papel que ocupan la celulosa, hemicelulosa y lignina en la pared celular.

- **Celulosa:**

La celulosa es un biopolímero formado por la unión de moléculas de β -D-glucosa mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico.

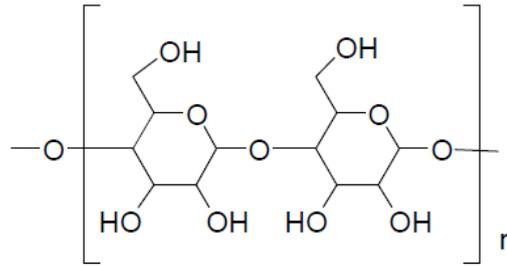


Figura I.3.1 Molécula de celulosa

- **Lignina:**

La lignina es un polímero fenólico reticulado que forma materiales estructurales importantes para las plantas. Es especialmente importante en el caso de la madera y la corteza para la formación de las paredes celulares.

Para la fabricación de pulpa y papel, la lignina es el componente indeseable de la madera. Si no hubiera lignina en la madera no sería necesario aplicar fuertes reactivos ácidos o alcalinos para la deslignificación química de la madera.

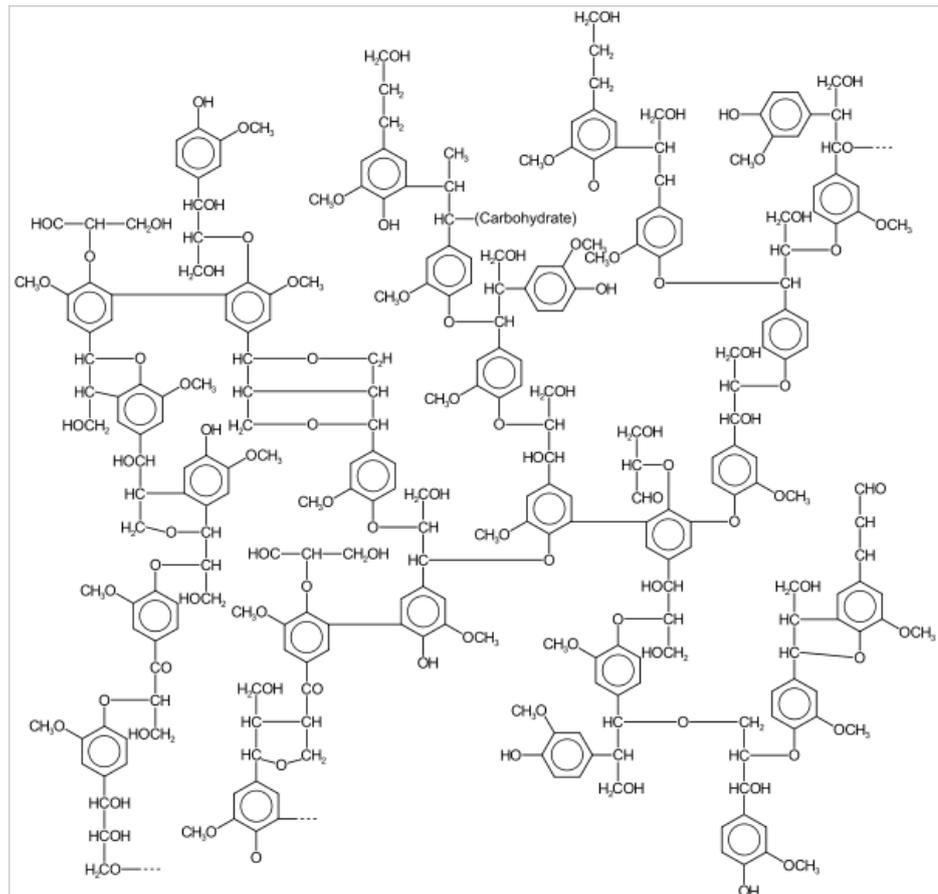


Figura I.3.2: Estructura química de la lignina

- **Hemicelulosa:**

La lignina y la celulosa presentes en las paredes celulares de las plantas se encuentran interpenetradas por una mezcla de polisacáridos a los que denominamos hemicelulosa.

Estas hemicelulosas son moléculas orgánicas formadas por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, formados a su vez por un solo tipo de monosacáridos unidos mediante enlaces β -1,4 que forman cadenas lineales ramificadas (a diferencia de la celulosa) y con un peso molecular mucho menor que la celulosa.

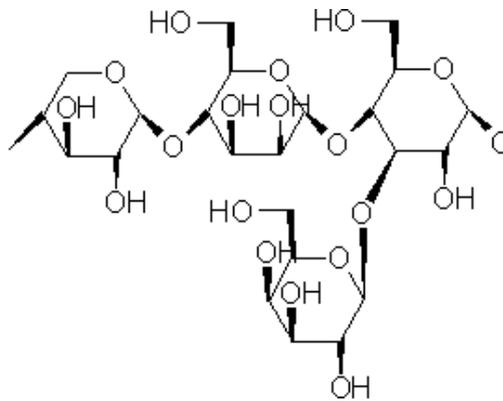


Figura I.3.3: Molécula de hemicelulosa

3.2.2. Otras fibras vegetales no maderables

Como se mencionó anteriormente, también son usadas aunque minoritariamente otros tipos de fibras además de la madera.

- **Fibra de algodón:**

Están constituidas por células sencillas en forma de filamento. Son la base para la mayoría de los papeles de trapo, que actualmente se usa para papeles finos de escritura.

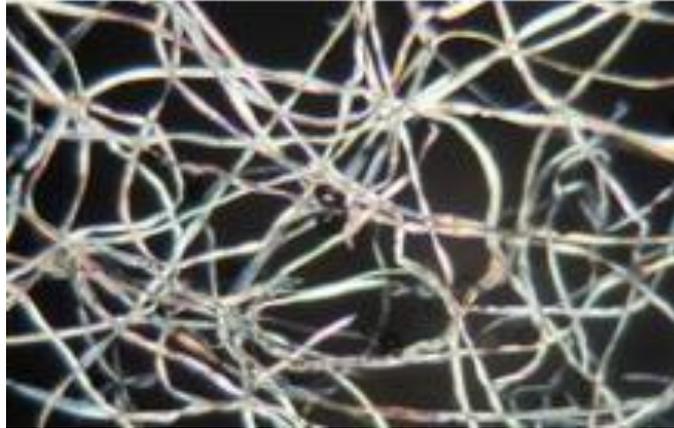


Figura I.3.4: Fibras de algodón vistas con microscopio

- **Fibras liberianas:**
Se obtienen de la porción exterior (llamado líber, de ahí su nombre) del tallo de las plantas dicotiledóneas.
- **Fibras de gramíneas:**
En este grupo se incluyen aquellas obtenidas de los haces vasculares de algunas plantas monocotiledóneas
- **Fibras de hojas:**
Son hilos de fibras aislados de algunas plantas, se obtienen raspando las células de la hoja que rodean a los haces vasculares longitudinalmente orientados.
- **Fibras animales:**
Se usan para la fabricación de papeles saturados y cartones con características especiales, estas fibras animales se encuentran en forma de lana, seda y cuero principalmente.
- **Fibras minerales:**
Destacan las fibras de asbesto usadas durante muchos años en la fabricación de papel no combustible y las fibras de vidrio que tienen las ventajas de una alta resistencia a altas temperaturas, agentes químicos y biológicos, pero tienen el inconveniente de la falta de adhesividad entre fibras.
- **Fibras regeneradas y sintéticas:**
Al igual que con las fibras de vidrio, el mayor inconveniente para el uso de este tipo de fibras es la imposibilidad de desarrollar uniones fuertes de fibra a fibra. Para mejorar la fuerza de estas uniones se están estudiando técnicas termoplásticas y técnicas a base de solventes y polímeros sintéticos.



3.3. Pulpa de Madera

El uso de la pulpa de madera comenzó en el siglo XIX, las razones principales fueron el bajo coste de la madera, su amplia disponibilidad, la variedad de tipos de fibra dependiendo de la especie de madera y su comodidad tanto para el manejo como para el almacenamiento.

En la década de los 70 y 80 con el desarrollo de nuevas técnicas de procesado comenzó el aserradero y astillado de árboles enteros, lo que proporcionó otro nuevo método de obtener astillas (astillas de árbol entero).

Las astillas de árbol completo incluyen los últimos avances en el aserradero, se suelen utilizar puntas y ramas (madera delgada).

3.3.1. Almacenamiento de la madera

Para proporcionar a la fábrica un abastecimiento continuo es fundamental habilitar una zona próxima destinada al almacenamiento. En este punto conviene diferenciar el almacenaje de madera sólida (troncos) el cual puede almacenarse durante varios años sin perder prácticamente ni calidad ni cantidad, con el almacenaje de astillas.

3.3.1.1. Madera sólida

El método tradicional consiste en almacenar los troncos y convertirlos en astillas cuando se vayan a usar para la producción de pulpa. Si la madera no se seca antes de convertirla en pulpa pueden surgir problemas en el proceso.

3.3.1.2. Astillas

Este método de almacenaje comenzó en la década de los 50, sin realizar previas investigaciones sobre su conservación, ya que se supuso (incorrectamente) que el almacenamiento de astillas sería igual que el de los troncos.

Esto no es así debido a que la superficie específica de las astillas es mucho mayor que la de los troncos, por lo que ocurren 3 fenómenos que en los troncos no se consideran:



- La degradación biológica de la madera a causa de numerosas bacterias y hongos.
- Reacciones exotérmicas en algunos materiales extractivos de la madera al oxidarse.

Estas astillas se almacenan en grandes pilas, y debido a estas causas en el interior de estas pilas se produce un incremento notable de la temperatura, lo que en ocasiones provoca que la propia madera arda, incluso parte de las astillas que no llegan a arder provocan un aumento en el contenido en lignina de la posterior pulpa producida por lo que son menos deseables a la hora de fabricar papel.

Desde que se inició, se ha optimizado el almacenamiento en forma de astillas aplicando siguiendo las siguientes pautas:

- Utilizar varias pilas pequeñas en lugar de una mayor, de esta forma se utilizará siempre la pila más antigua, reduciendo el tiempo de espera de almacenaje.
- Evitar alturas demasiado elevadas en las pilas, ya que la temperatura es función de la altura de la pila.

Aun así, es imposible evitar totalmente el calentamiento en las pilas de astillas, por lo que las empresas asumen unas pérdidas de aproximadamente el 1% de la madera en este tipo de almacenaje.

3.3.2. Descortezado

La corteza de los árboles tiene poco valor como fibra, consume parte de los productos químicos que se usan en la producción de pulpa y da lugar a una pulpa más débil y sucia, por lo que es necesaria su eliminación, al menos la mayor parte, para continuar con el proceso. La mayoría de fábricas se fijan un valor máximo en torno al 1% de corteza, aunque este valor depende del equipo utilizado y del uso que se le vaya a dar posteriormente a la pulpa. Los descortezadores pueden ser:

- **Descortezadores de tambor:**

Están destinados a grandes instalaciones, son equipos de gran volumen, consisten en un tambor giratorio de hasta 4,6 metros de diámetro y 21 metros de longitud, que están preparados para operar con troncos pequeños y cortos (de pequeño diámetro y con una longitud de 1,2m a 2,4m) y preferiblemente rectos.

- **Descortezadores de anillo:**

El elemento descortezador consiste en un anillo giratorio con un número variable de cuchillas curvas que cortan la corteza mientras el rollo va pasando a través del anillo. Los troncos son introducidos en la maquina horizontalmente y a diferencia del caso anterior, se descortezan de forma individual.

Entre sus ventajas destacan su simpleza mecánica, su reducido tamaño en comparación con los de tambor, y que funcionan en ausencia de agua, lo que evita los problemas del tratamiento posterior del fluido. Suelen utilizarse para troncos de gran tamaño ya que la operación se realiza secuencialmente y de forma individual, además la curvatura de los troncos no es un inconveniente, ya que los rascadores se van acoplando a los cambios en el diámetro y la forma del tronco. Su principal inconveniente es el daño que puede sufrir la superficie del tronco por la acción de estos rascadores, lo que provoca un daño directo en las fibras de la pulpa final.



Figura I.3.5: Descortezador de anillo



3.3.3. Astillado

Los troncos se reducen a astillas para lograr una saturación rápida y completa con los licores de cocción. En esta operación hay que tener especial cuidado en el barrido de los extremos de las astillas y el aplastamiento de las fibras, lo que las puede deteriorar y repercutir en la calidad de la pulpa y del papel.

3.3.4. Cernido de la madera

Cuando salen del astillador, las astillas no tienen el tamaño homogéneo que sería deseable, tienen astillas de mayor tamaño del requerido junto con pequeñas rajadas de madera y astillas de menor tamaño como los “finos” que básicamente son serrín, pequeñas partículas de corteza y astillas de menos de 6,2mm.

Al finalizar esta operación, las astillas son enviadas a silos o tolvas de almacenamiento, y desde ahí a los digestores, que es la siguiente etapa del proceso, mediante diversos **sistemas de transporte**.

- Los transportadores de bandas, con un consumo muy reducido de energía pueden transportar grandes cantidades de astillas a largas distancias.
- Los transportadores neumáticos tienen un coste inicial menor, pero la potencia requerida es de 4 a 10 veces mayor que en los de bandas.

3.3.5. Calidad de las astillas

Llegados a este punto, veremos algunos de los parámetros más importantes que afectan a la calidad de las astillas.

3.3.5.1. Distribución por el tamaño de la astilla

El tamaño de las astillas debe ser un punto intermedio entre el compromiso por obtener unas fibras de calidad y una rápida producción de la pulpa. Este tamaño depende de cada fábrica, el equipo digestor, el equipo para el lavado de la pulpa, los requerimientos de blanqueo y las especificaciones del producto que se quiere llegar a obtener.



3.3.5.2. *Humedad de las astillas*

Conocer el contenido de humedad es importante por dos motivos: por una parte, para controlar mejor el proceso es necesario que el contenido de humedad sea constante, para que el cociente licor/madera y las concentraciones químicas de los licores sean constantes en todas las cocciones.

Para determinarlo, se suele pesar una muestra de 1 a 2 kg de astillas, a continuación, se seca en un horno a 105°C y se vuelve a pesar de forma que:

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de la madera húmeda}} * 100$$

$$\text{Contenido en sólidos} = 100 - \text{Contenido en humedad}$$

3.3.5.3. *Densidad de las astillas*

Esta densidad es muy variable, viene determinada por la densidad de la madera de la que provienen, el contenido de humedad, el tamaño de las astillas, el grado de compactación mecánica etc. Puede expresarse tanto sobre la base de madera seca (cuyos valores varían de 128 a 256 kg/m³), como sobre la base de madera húmeda (con valores que van de 240 a 640 kg/m³).

3.3.5.4. *Largo de la fibra*

Siempre se ha tenido la idea de que a mayor longitud de las fibras mayor resistencia en el papel, y diversos estudios así lo han mostrado: cuanto más largas son las fibras, más resistencia a la rotura presenta posteriormente el papel, sin embargo, la característica que más se asocia a un papel fuerte es la tensión, y esta propiedad está relacionada con los enlaces entre las fibras, no con la longitud de estas.



3.4. Producción de pulpa

La pulpa se obtiene por la separación de las fibras de las astillas, estas fibras se mantienen unidas en la madera y otros materiales fibrosos naturales por medio de fuerzas adhesivas propias de los polímeros intercelulares, esta separación se puede lograr por medios químicos, mecánicos o una combinación de ambos.

En la obtención de pasta mecánica (sin eliminación de lignina), esta separación ocurre tanto entre las fibras, como a través de las paredes de las mismas, el carácter de la pulpa, por lo tanto, depende de la cantidad y forma de la energía suministrada para lograr esta división.

En la producción de pulpa por medios mecánicos los compuestos químicos no se ven afectados a excepción de los solubles en agua que son eliminados, los medios químicos por el contrario se basan en la eliminación de la lignina que une las fibras.

3.4.1. Producción de pulpa con refinador mecánico

En este proceso, la reducción mecánica de las astillas se realiza con un refinador, que es un molino de discos de fricción.

El diseño de estos refinadores es muy importante para un correcto funcionamiento del proceso, por norma general tienen tres secciones:

- Sección de barra rompedora: su función es quebrar las astillas, para ello está equipada con barras anchas y surcos profundos,
- Sección de barra refinadora intermedia: equipada con barras angostas de forma paralela y ranuras poco profundas,
- Sección de barra fina: en esta sección se lleva a cabo la última parte del proceso, la fibrilación, la cual será descrita a continuación.

Estos equipos necesitan una potencia aproximada de 10.500 kW, su diámetro del disco es de 137 cm, y tienen una velocidad de giro de unas 1500rpm. En ellos el vapor generado durante el proceso juega un papel importante, ya que al ser evacuado es necesario que escape por la zona de rotura de las astillas o por la entrada, para que ablande las astillas antes de ser desgarradas.

La pulpa permite un rango más amplio de materias primas para su producción.



3.4.1.1. *Proceso*

Se trabaja con astillas, que se envían al disco refinador mediante cintas transportadoras.

En el proceso podemos diferenciar dos etapas:

- **Etapas de desfibrado:**
En esta primera etapa, se transforman las astillas en fibras simples. El objetivo es producir la mayor cantidad posible de fibras con el mínimo de desperdicio y minimizando el consumo energético. Para lograr este desfibrado sin reducir el largo de la fibra, es necesaria una alta consistencia y holgura en la placa del refinador, el contacto de la fibra con la placa debe minimizarse lo máximo posible para evitar este acortamiento.
- **Etapas de fibrilación:**
En la segunda etapa, parte de estas fibras son reducidas a fibrillas y fragmentos de pared celular, que proporcionaran las características de unión que necesita el papel. Esta etapa se debe realizar a elevada consistencia para evitar de nuevo el indeseable acortamiento de las fibras y requiere un elevado consumo energético.

3.4.2. Producción de pulpa semiquímica: proceso al sulfito neutro o NSSC

En primer lugar, conviene aclarar el término semiquímica, esto hace referencia a que utiliza una combinación de pretratamientos químicos, seguidos de etapas de desfibrilación puramente mecánicas. Este proceso también es conocido industrialmente por las siglas NSSC y se divide en dos etapas.

En la primera etapa, las astillas reciben un tratamiento químico suave a elevadas temperaturas para ablandarlas y eliminar parte del material lignocelulósico presente entre fibras.

La segunda etapa es el refinado mecánico, se realiza para completar la separación de las fibras.



3.4.2.1. *Proceso NSSC*

El efecto del sulfito sódico sobre la madera es el de sulfonar la lignina, transformándola en ácidos sulfónicos solubles, aunque en condiciones neutras la velocidad de este proceso se reduce bastante, además de aumentar la cantidad requerida de reactivos, por el contrario, se tiene la ventaja de obtener pulpas de mayor blancura y de mayor resistencia. Para mantener el pH neutro se utiliza un tampón con base de bicarbonato sódico, el cual se agrega de modo tal que sea capaz de neutralizar los ácidos orgánicos que se crean durante la digestión.

La digestión de las astillas se lleva a cabo a una temperatura de 120°C, durante un tiempo inferior al de la cocción total (separación total de lignina), durante el cual el licor impregna las astillas, se sulfona la lignina y se hidroliza los ácidos generados. Las astillas parcialmente convertidas en pulpa son introducidas a continuación en un refinador mecánico donde son desfibradas sin ocasionar daños a las fibras.

Mediante este proceso, se elimina entre el 25 y el 50% de la lignina y entre el 30 y el 40% de las hemicelulosas, lo que resulta un porcentaje muy bajo en comparación con los métodos químicos (90 a 98% eliminación de lignina y 50 a 80% eliminación de hemicelulosas); este no es un problema crítico, pues debido al tratamiento, la lignina es fácilmente eliminable durante el blanqueo de la pasta, cuando ésta se emplea en la fabricación de papel, por lo que el resultado final se asemeja mucho a las pastas totalmente químicas. De esta forma, la gran ventaja que se obtiene por este proceso es la posibilidad de obtención de pulpas blanqueada de calidad química a partir de maderas duras, con unos rendimientos del 60%, superiores a los valores típicos para el proceso químico, que se sitúan entre 45 y 50%. Para este tipo de maderas, la resistencia obtenida en el papel es mayor a la correspondiente al proceso químico.

El proceso NSSC es el más utilizado entre los métodos semiquímicos, ya que los productos obtenidos son superiores al resto de los métodos, la recuperación de reactivos es más sencilla y económica y al operar a pH neutros, el costo de los equipos es menor, pues no requieren materiales resistentes a ácidos y bases. En cuanto a los requerimientos energéticos de funcionamiento, estos se estiman entre 180 a 360 kWh por tonelada de pulpa



producida, lo que resulta bastante económico en comparación con los otros métodos.

Finalmente, el rendimiento obtenido por el proceso NSSC es variable en función del tipo de pulpa que se desee obtener y de la eficacia de pulpa a madera. Así, para rendimientos superiores al 80% la resistencia del papel fabricado es muy baja, pero aumenta constantemente al disminuir el rendimiento hasta aproximadamente el 65%. Por ejemplo, en la fabricación de medios corrugantes y papel de envolver, se puede trabajar satisfactoriamente a un rendimiento del 75%, aunque esta pulpa contenga cierta cantidad de astillas, las cuales pueden ser separadas por separación centrífuga. Para la producción de papel de calidad libro se puede operar a rendimientos del 64%, sobre base de pulpa blanqueada.

3.4.3. Producción de pulpa al sulfito

El procedimiento al sulfito dominó la industria papelera desde finales del siglo XIX hasta mediados del XX, a pesar de estar limitado por los tipos de madera utilizables y por la contaminación creada al eliminar el licor residual sin tratar en los cauces.

Aunque suele utilizarse la digestión en medio ácido, existen variantes en las que se emplean un medio neutro o un medio básico. El licor de cocción de ácido sulfuroso (H_2SO_3) e ion bisulfito (HSO_3^-), se prepara in situ. Se quema azufre elemental para producir dióxido de azufre (SO_2), que se hace pasar a través de una torre de absorción que contiene agua y una de las cuatro bases alcalinas (CaCO_3 , el sulfito original, Na_2CO_3 , hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) o hidróxido amónico (NH_4OH) que producen el ácido y el ion y controlan sus proporciones. Normalmente, la pasta al sulfito se carga en digestores discontinuos revestidos de ladrillos.

Para evitar reacciones no deseadas, los digestores se calientan hasta una temperatura de 130 a 140 °C y las astillas se cuecen durante un periodo de 6 a 8 horas. cuando la presión del digestor aumenta, el dióxido de azufre gaseoso (SO_2) se purga y se vuelve a mezclar con el ácido de la cocción. Cuando quedan aproximadamente de 1 a 1,5 horas de cocción, se detiene la calefacción y se disminuye la presión extrayendo gas y vapor de agua. La pasta se descarga en un tanque, se lava y criba.



La mezcla usada en la digestión, llamada licor rojo, se puede utilizar para recuperar calor y productos químicos en todos los procedimientos menos en el que tiene como base bisulfito sódico. Para la pasta al sulfito amónico, el licor rojo diluido se deja primero para eliminar el dióxido de azufre residual, se concentra y se quema. El gas que sale contiene SO_2 se enfría y se pasa a través de una torre de absorción en la que se combina con amoníaco para regenerar el licor de cocción. Por último, el licor se filtra, se refuerza con SO_2 y se almacena. El amoníaco se transforma en nitrógeno y agua en la caldera de recuperación por lo que no se puede recuperar.

En la pasta al sulfito de magnesio (MgSO_3), al quemar el licor concentrado se obtiene óxido de magnesio (MgO) y SO_2 , los cuales se recuperan con facilidad. No se produce fusión en este proceso; se recoge bastante MgO del escape de gas y se apaga con agua para producir hidróxido de magnesio (Mg(OH)_2). El SO_2 se enfría y se combina con el Mg(OH)_2 en una torre de absorción para reconstituir el licor de cocción. El bisulfito de magnesio ($\text{Mg(HSO}_3)_2$) se refuerza con SO_2 y se almacena. Es posible una recuperación del 80 al 90 % de los reactivos de cocción. La recuperación del licor de cocción de la base de sulfito sódico es más complicada. Se incinera el licor de cocción concentrado utilizado y aproximadamente el 50 % del azufre se transforma en SO_2 . El resto de azufre y de sodio se recoge del fondo de la caldera de recuperación como una fusión de Na_2S y Na_2CO_3 . Esta se disuelve para producir licor verde, que se transforma en bisulfito sódico (NaHSO_3) en varios pasos. El NaHSO_3 se refuerza y se almacena. En el proceso de recuperación se producen algunos gases sulfurados, sobretodo sulfuro de hidrógeno (H_2S), que es altamente peligroso.

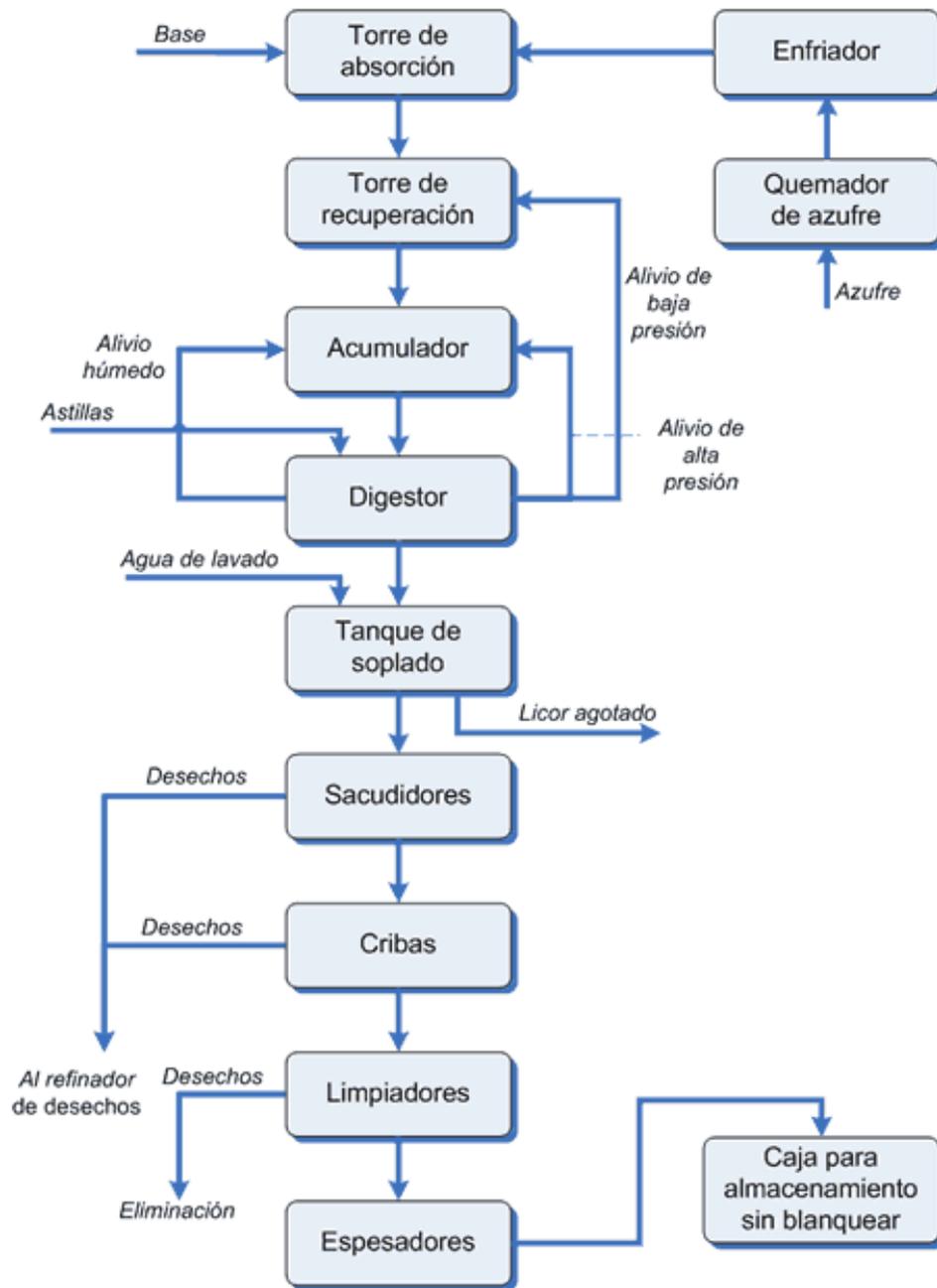


Figura I.3.6: Diagrama del proceso de producción de pulpa al sulfito

3.4.4. Producción de pulpa alcalina

Hay dos procesos alcalinos que se usan en la obtención de pulpa, a la sosa y al sulfato. Actualmente apenas existen fábricas de obtención de pulpa mediante el proceso a la sosa, ya que la mayoría con el paso del tiempo se han ido reconvirtiendo al proceso al sulfato.



Ambos tienen en común el hidróxido sódico como principal producto químico usado para la cocción, pero en el proceso a la sosa el licor de cocción utilizado es principalmente sosa caústica, mientras que en el proceso al sulfato, el licor de cocción está compuesto por sulfuro de sodio e hidróxido sódico. Este sulfuro en el licor de cocción implica una cocción más rápida en el proceso al sulfato y una mayor resistencia en la pulpa obtenida posteriormente, por lo que la inmensa mayoría de fábricas lo han ido incorporando en el licor de cocción, y será en el que nos centraremos para describir el proceso.

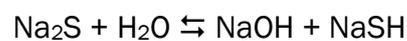
3.4.4.1. *Proceso al sulfato*

La mayoría de las especies de madera pueden transformarse en pulpa mediante este proceso, por lo que es el uso final de la pulpa, la que determina que especies de maderas son más apropiadas.

Estas especies de madera influyen en el proceso, ya que las maderas duras (maderas de árboles hojosos) tienen longitudes de fibra más cortas y menos lignina que las maderas de coníferas. En consecuencia, el tiempo de cocción para este tipo de maderas es menor, ya que al haber menos cantidad de lignina se requiere menos tiempo para que se separe.

El proceso comienza introduciendo las astillas y el licor de cocción (mezcla de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio que incluye pequeñas cantidades de carbonato de sodio, sulfato y sulfito de sodio) en el digestor. Estas cantidades de sulfuro de sodio dependen de la fábrica, pero por norma general las calidades normales de papel requieren menos productos químicos en la cocción que las calidades más finas.

El sulfuro de sodio se hidroliza en agua formando hidróxido sódico y sulfhidrato de sodio:



Esta reacción es reversible y hay un equilibrio químico entre los 4 constituyentes. El sulfuro de sodio agregado al licor aumenta el hidróxido de sodio disponible, según se va consumiendo el NaOH la reacción se desplaza hacia la derecha para mantener el equilibrio. El sulfuro de sodio aumenta la velocidad de separación de la lignina porque la reacción del sulfuro sódico ácido con la lignina introduce el grupo -SNa, que aumenta la solubilidad de la lignina.



Durante el tiempo de cocción que dura entre 2 y 4 horas, se controla cuidadosamente la concentración del licor y la humedad entre otras variables. La presión de operación varía entre 7 y 7,7 kg/cm² y durante la cocción se destila aguarrás y otros volátiles los cuales pueden condensarse para venderse como subproductos de la operación.

Cuando termina la cocción el propio vapor a presión provoca la descarga y deja preparado el digestor para una nueva carga sin necesidad de limpieza adicional, es frecuente además, que se emplee la integración energética para aprovechar la entalpía de este vapor como calefacción para calentar el agua usado en la fábrica.

En el tanque de descarga se encuentran la pulpa, la lignina y otros sólidos extraídos de la madera en la cocción y el licor negro que contiene los reactivos de cocción gastados. Se utiliza licor negro diluido para diluir la pulpa y el licor negro y se bombea el conjunto pasando por unos separadores de nudos hasta los lavadores de pulpa sucia, donde la pulpa se separa del licor mediante lavado.

Finalmente, la pulpa se depura y se envía a la estación de blanqueo o a la fábrica de papel y parte del licor negro se usa como diluyente y el resto se envía a la unidad de recuperación, donde se regeneran los productos químicos utilizados en la digestión.

3.4.5. Comparativa de pulpas mecánicas y químicas

En general, la comparación entre los dos grandes grupos de procesado de pulpa, el químico y el mecánico, arroja las siguientes conclusiones.

Tabla I.3.1: Comparación de la pulpa mecánica y química

Parámetro analizado	Pulpa mecánica	Pulpa química
Consumo energético	1000 KW/T pulpa	Autosuficiente
Rendimiento	95%	45%
Tamaño de fibra	Fibras cortas	Fibras largas
Resistencia del papel	Baja	Alta
Costes de producción	Baja	Mayores que pulpa mecánica

En cuanto a resistencia mecánica de los tipos de pulpas obtenidas por los métodos discutidos, se puede destacar que las pastas químicas y semiquímicas producen papeles de mayor resistencia, siendo los métodos mecánicos claramente inferiores. En la gráfica se muestra la resistencia del papel en función de la densidad de la propia hoja, y se puede apreciar claramente la ventaja de las pulpas químicas y semiquímicas.

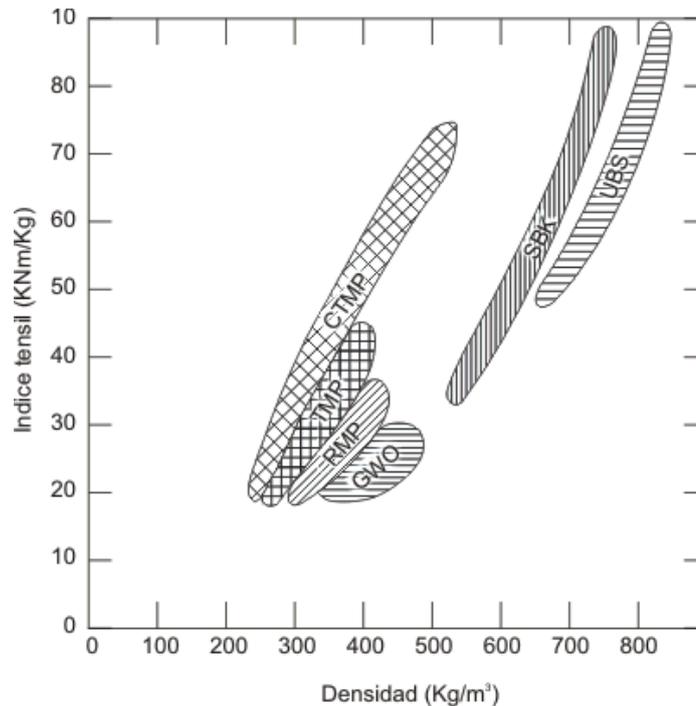


Figura I.3.7: Gráfica de la resistencia mecánica a tensión del papel en función de la densidad de la hoja

En la figura I.3.7 se representan las siguientes pulpas:

- Pulpa quimicotermomecánica (CTMP).
- Pulpa mecánica con piedra (GWO).
- Refinador mecánico (RMP).
- Pulpa termomecánica (TMP).
- Pulpa al sulfito sin blanquear (UBS).
- Pulpa Kraft semiblanqueada (SBK).

El auge de las pastas químicas a partir de los años 40 y 50 fue espectacular, tendencia que ha persistido hasta nuestros días, debido a sus ventajas y economía, aunque debido al aumento de producción de papel en países subdesarrollados, que no cuentan con la complicada tecnología de producción química, y el gran peso que supone la fabricación de papel de periódico (el cual se realiza en gran parte con pasta mecánica), producen que la producción mecánica no se haya visto relegada al olvido.



3.5. Blanqueo

Desde un punto de vista químico, el blanqueo de la pulpa consiste en la eliminación de sustancias que absorben la luz.

Según la teoría de Kubelka-Munk tenemos la siguiente relación:

$$\frac{k}{s} = \frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}}$$

Donde:

- R_{∞} : factor de reflectancia con hojas de la misma pulpa como respaldo
- k : coeficiente de absorción de la luz (m^2/kg)
- s : coeficiente de dispersión de la luz (m^2/kg)

El color de la pulpa antes de ser blanqueada es amarillo o pardo. El objetivo del blanqueo consiste por tanto en eliminar el color y medir el efecto de blanqueo en aquellas partes del espectro en el que son más pronunciados los cambios.

3.5.1. Blanqueo de las pulpas mecánicas

En el blanqueo de las pulpas mecánicas tiene mucha importancia la madera con la que se fabricó la pulpa y algunas de sus siguientes propiedades:

3.5.1.1. Factores que influyen

- **Blancura de la madera**

El color varía mucho de unas especies a otras, por ejemplo, el álamo es una madera considerada bastante clara mientras que el ébano es una madera muy oscura



Figura I.3.8: madera de álamo



Figura I.3.9: madera de ébano



- **Cambios en el color durante el almacenaje**

El color de la madera tiende a cambiar a amarillo más oscuro o pardo durante el almacenaje, aunque si la madera se ve afectada por la acción de hongos el cambio puede ser hacia colores azulados y rojizos.

3.5.1.2. *Procesos utilizados en el blanqueo de la pulpa mecánica*

Hay dos métodos principales, el reductor y el oxidante. Estos métodos pueden utilizarse de forma separada o combinados en un proceso de dos etapas.

- **Blanqueo reductor de pulpas mecánicas**

A escala industrial se realiza en la mayoría de fábricas con ditionita (ion del ácido ditionoso y sus sales), por lo que será el proceso que explicaremos, aunque en ocasiones puede realizarse también con bisulfito o una mezcla de sulfito y bisulfito, métodos que no explicaremos dado que no es el objetivo de este trabajo.

Lo más frecuente es aplicar la ditionita de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), anteriormente se usaba la de zinc que es más estable, pero tiene el inconveniente de que es tóxica para los peces.

Por lo general, si el blanqueo se realiza con baja consistencia, la respuesta máxima se obtiene con una consistencia aproximada del 4%. El aire oxida fácilmente la ditionita, y a elevadas consistencias, la pulpa contiene una cantidad considerable de aire, lo que provoca que una parte considerable del agente blanqueante se pierda por oxidación.

La temperatura influye de forma considerable en la respuesta al blanqueo, la blancura máxima se obtiene a 70°C , una temperatura menor es desfavorable, ya que la suspensión de pulpa tendría demasiado oxígeno.

En cuanto al pH, el ácido ditiónico es un ácido bastante débil y la sal de sodio produce una solución alcalina. El pH disminuye rápidamente cuando se mezcla ditionita con la pulpa, debido a los grupos ácidos que se forman a consecuencia de la reacción de blanqueo, y por la reacción entre la ditionita y el oxígeno

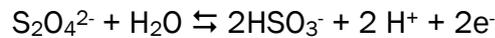


presente en la pulpa. El pH óptimo se obtiene entre 5 y 6, siendo una unidad menor para el caso de la ditionita de zinc.

La velocidad de reacción es elevada, terminando el proceso de blanqueo en un periodo de 10 a 15 minutos, y después de este periodo inicial de blanqueo se produce un ligero aumento en la blancura durante unas 2 horas ocasionado por los productos de la descomposición de la ditionita.

A continuación, se trata con SO₂ para obtener un blanqueo adicional.

La reacción que se produce es la oxidación de la ditionita en sulfito:



Esta ecuación indica que la reducción será más eficiente con un aumento del pH, obteniéndose el óptimo en pH=9.

Además, la reacción reductora debería proceder más fácilmente con una concentración baja de sulfito, sin embargo, la adición de sulfito parece mejorar los resultados de blanqueo en la medida en que parte de la ditionita se puede sustituir por sulfito. Por lo tanto, deben existir otras reacciones además de la deformación del sulfito, a consecuencia de la reacción de blanqueo. Es posible que la reacción con el oxígeno presente en el aire produzca bisulfito, sulfato e iones de hidrógeno.

- **Blanqueo oxidante de pulpas mecánicas**

Se han probado varios agentes oxidantes para el blanqueo de pulpas mecánicas, pero el peróxido es el único que se aplica industrialmente.

En primer lugar, destacar que no hay diferencia entre usar peróxido de sodio o de hidrógeno, excepto para ajustar el pH. El pH debe estar entre 10 y 11, por lo que si se usa peróxido de sodio, se debe agregar ácido sulfúrico para disminuir el pH, mientras que si se usa peróxido de hidrógeno, se deberá agregar un álcali.

El blanqueo se suele llevar a cabo en una torre con flujo descendente, aunque también puede ser ascendente o una combinación de ambos. Se utiliza una prensa o un dispositivo de filtrado para espesar la pulpa antes de blanquearla. En



ocasiones también se aplica un agente quelante antes del espesado, después del espesado se calienta la pulpa hasta 40-60°C.

Los reactivos se miden mediante bombas como soluciones individuales, y se mezclan en el instante antes de agregarlos a la pulpa. La consistencia del blanqueo depende del equipo para la eliminación del agua y del equipo utilizado para mezclar la pulpa y el blanqueador, se aplican consistencias entre el 10 y el 20%. El tiempo de retención varía entre 90 minutos y 3 horas.

En la parte baja de la torre se diluye la pulpa con agua hasta tener una consistencia en torno al 3-4% antes de descargarla en la torre. Como la pulpa es alcalina, debe reducirse el pH de la suspensión para evitar que se produzca reversión de color, normalmente hasta un pH de 5,5 que es el que corresponde a la pulpa sin blanquear.

3.5.2. Blanqueo de pulpas químicas

Las pulpas químicas sin blanquear son muy oscuras, este color se debe fundamentalmente a la lignina presente.

El blanqueado de la pulpa química se realiza en varias etapas. En los molinos modernos, el blanqueado comienza con la deslignificación con oxígeno para reducir el consumo de químicos blanqueadores más caros y reducir la carga de efluentes de la planta de blanqueado.

Los métodos de blanqueado predominantes son libres de cloro elementalmente (ECF) y libres de cloro totalmente (TCF). En el blanqueado clásico con cloro, el cloro molecular o el gas de cloro se utiliza con otros químicos que contienen cloro como el hipoclorito. Por razones medioambientales y de calidad, otros químicos blanqueadores están reemplazando al cloro molecular e hipoclorito.

En el blanqueado TCF, los químicos disponibles para el blanqueado TCF son: oxígeno, peróxido de hidrógeno, ozono y perácidos. En el blanqueado ECF se utiliza dióxido de cloro con químicos libres de cloro.



3.5.2.1. *Deslignificación con oxígeno*

Las ventajas que tiene son las siguientes:

- Consumo reducido de químicos blanqueadores.
- Menor contenido de fibras, reducido contenido de exudado. fuerza mantenida de pulpa.
- Facilita el cierre del sistema
- Tecnología probada con eficiencia, adecuada para cambios futuros al proceso.

La deslignificación con oxígeno se puede considerar en parte como una continuación de la cocción y en parte como la primera etapa del blanqueado. Hoy es una etapa estándar en la producción de pulpa química blanqueada. Los beneficios del costo de la producción son aparentes tanto en el blanqueado ECF como en el TCF.

En la etapa de deslignificación con oxígeno, la pulpa se trata con oxígeno en un recipiente presurizado a temperaturas elevadas en un entorno alcalino. La deslignificación puede variar en el rango de 40-70% dependiendo de la materia prima de madera y si se emplean uno o dos reactores en serie. La pulpa de fabricación (sulfato) sin blanqueado tiene un contenido de lignina de 3-5% que, después de la deslignificación con oxígeno, puede disminuirse a 1,5%.

El balance entre la cocción y la deslignificación con oxígeno:

- Desde el punto de vista de blanqueabilidad, selectividad y rendimiento, es mejor extender la deslignificación con oxígeno en lugar de extender la cocción.
- La fabricación por cocción se debe optimizar junto con la deslignificación con oxígeno.
- Extender la cocción, pero no mucho, permite que la deslignificación con oxígeno realice la tarea.

La importancia del buen lavado:

- Un lavado deficiente antes de la deslignificación con oxígeno aumenta el alcalino y el oxígeno y afecta la selectividad.
- Transferir COD al reactor debe ser por debajo de 100kg/ton.
- El COD de la deslignificación con oxígeno consume químicos de blanqueado. La eliminación/lavado completo es importante.

**Tabla I.3.2: Condiciones en una etapa de deslignificación con oxígeno de consistencia media**

	Unidades	Valores
Grado de deslignificación	%	40-50
Consistencia de la pulpa	%	10-15
Presión	MPa	0,4-0,6
Temperatura	°C	85-95
Tiempo	min	60

3.5.2.2. Extracción alcalina reforzada con oxígeno

El agregado de oxígeno a la pulpa en la extracción alcalina es un método eficiente para aumentar el efecto de blanqueado y disminuir el consumo de químicos blanqueadores más caros. El oxígeno mejora la disolución de lignina. A la etapa de extracción reforzada con oxígeno se la denomina EO. Cuando se agrega peróxido, se denomina EOP.

Se realiza una etapa de extracción con oxígeno elevando la temperatura en la etapa, aumentando la carga de oxígeno, presurizando el tubo de pre-retención y agregando peróxido de hidrógeno. El factor más importante es la temperatura.

Tabla I.3.3: Condiciones en una etapa de extracción reforzada

	Unidades	Valores
Consistencia de la pulpa	%	10-15
Temperatura	°C	60-70
Carga de NaOH	Kg	0.8-1.2
Carga de O ₂	Kg	3-5
Carga de H ₂ O ₂	kg	0-3
Presión	bar	1.5
Tratamiento de oxígeno	min	5-15
Tiempo total de retención	min	30-90
pH (final)		10-11



3.5.2.3. *Blanqueado con peróxido reforzado con oxígeno*

Las etapas de peróxido presurizado (PO) son una ventaja en el blanqueado totalmente libre de cloro (TCF) haciendo posible lograr un brillo mayor final. En secuencias con dióxido de cloro (blanqueado ECF), una etapa potente de peróxido reducirá el consumo de dióxido de cloro o incluso reemplazará una etapa de dióxido de cloro.

Una etapa de peróxido caliente presurizado opera a temperaturas por arriba de 100 °C con pequeña cantidad de oxígeno agregado. Un pre-requisito para que el blanqueado con peróxido sea eficiente es que el contenido de iones de metal, por ejemplo, manganeso, cobre y hierro, sea bajo.

3.5.2.4. *Blanqueado con ozono*

El ozono se introdujo como químico de blanqueado a escala industrial a principios de los años 1990. La principal fuerza propulsora fue lograr brillo completo de la pulpa sin utilizar químicos que contienen cloro. Hoy se emplea en el blanqueado TCF y ECF. Como el ozono es un agente de blanqueado potente, se reduce el consumo de otros químicos blanqueadores.

El ozono se produce en el sitio por medio de una descarga eléctrica silenciosa en un flujo de gas que contenga oxígeno. Las cantidades de ozono requeridas para blanquear la pulpa se producen a partir del oxígeno, que es más económico. El gas de alimentación debe estar esencialmente libre de agua y compuestos orgánicos. El límite superior práctico de concentración de ozono es alrededor del 13%.

3.6. Desintegración

A partir de este punto se tratan los procesos relativos a la fabricación de papel, desde que llega la pulpa a la fábrica de papel o cartón.

La preparación de la pasta y el sistema del flujo de alimentación son una parte muy importante en el sistema de las fábricas de papel y la inversión en estas operaciones es cuantiosa. El personal empleado para operar el



equipo debe de estar capacitado y dichas operaciones son esenciales para que el papel producido reúna las especificaciones adecuadas.

La desintegración consiste en obtener fibras de pulpa suspendidas en agua que se puedan bombear de forma continua hacia el resto de procesos. Es importante separar las fibras individualmente, de manera que no se agrupen o aglomeren formando flóculos o bolas de pasta, esto rara vez se consigue por completo durante el proceso de desintegración, por lo que es frecuente que al terminar el proceso gran parte de la pasta en suspensión contenga bolas o floculos pequeños de pulpa no desintegrada.

3.6.1. Factores que afectan a la desintegración de la pulpa

Un aspecto clave del proceso es efectuar la desintegración con un coste mínimo, es decir, con un consumo mínimo de energía. Los factores más importantes que controlan la selección del equipo usado para ello y el método operativo son los siguientes:

3.6.1.1. Contenido en fibra de la pulpa

El contenido de fibra en base seca de la pulpa puede variar desde casi el 90% en el caso de hojas secadas al aire hasta alrededor del 2% en el caso de pulpa en suspensión acuosa. Cuanto más alto sea el contenido de pulpa en base seca, más prolongado será el tiempo de desintegración y mayor el consumo de energía.

3.6.1.2. Forma física de la pulpa

La pulpa se puede suministrar en hojas secas o húmedas, a granel húmedos, en láminas húmedas, o como pulpa en suspensión acuosa. La forma en que llega determinará el método para su manejo.

3.6.1.3. Amplitud de la deslignificación

El consumo de energía requerido para la desintegración disminuye en el orden siguiente: desde la pulpa mecánica, que es la que requiere más energía, pasando por la pulpa semiquímica, por la no blanqueada y por las pulpas totalmente blanqueadas, que son las que consumen la menor cantidad de energía. Esta diferencia



resulta especialmente observable cuando las pulpas están secadas al aire.

3.6.1.4. Largo de la fibra

Una diferencia importante es la que existe entre la pulpa de madera y las fibras no maderables de longitud relativamente cortas contra las fibras de trapos y otros textiles, cuyas fibras son muy largas. Por lo general, el equipo adecuado para el manejo de las fibras cortas no lo es en el caso de pulpas con fibras largas.

3.6.1.5. Consistencia de la descarga

La consistencia que usualmente se requiere para bombear y refinar la pulpa es del 4% al 6%, pero en ocasiones se requiere una descarga del 30% al 50% para el transporte mecánico.

3.6.1.6. Operación intermitente o continua

Los púlperes admiten los dos tipos de operación. Si se opera de forma continua con pulpa en hojas o a granel, la pulpa desintegrada se retira de forma continua a través de un depurador burdo con grandes agujeros que retienen las piezas de pulpa no desintegradas.

En la desintegración industrial es prácticamente imposible alcanzar la desagregación total de la materia, pues sería necesario un tiempo de trabajo excesivamente largo y un gran consumo de energía, por lo que es necesario admitir un pequeño porcentaje de aglomerados de fibras (pastillas) en la suspensión fibrosa saliente de la sección de desintegración. En algunos casos la consecución del objetivo fijado de obtención de un número limitado de pastillas puede ser logrado realizando la desintegración en varias etapas, y de esta manera reducirse el tiempo y la energía necesarios en la operación global de desintegrado.

La desintegración se realizaba antiguamente en las pilas holandesas o en los molinos de muelas, y en la actualidad en los púlperes.

3.6.2. Púlperes

Hablaremos brevemente de estos equipos, ya que en el capítulo 4 hablaremos en profundidad de los púlperes para papel reciclado, como el que diseñaremos posteriormente.

Un púlper consiste, esencialmente, en una cuba provista de un agitador. Normalmente la cuba es de acero y de forma cilíndrica. El agitador es de tipo turbina semiabierta, lo que provoca una alta turbulencia e intensos esfuerzos cortantes, y está colocado en el fondo o en una pared. En los púlperes de gran capacidad y con turbina en el fondo de la cuba, ésta suele tener en las paredes laterales unas aletas deflectoras de aproximadamente una décima parte del diámetro del tanque, con el fin de conseguir una mejor homogeneización y evitar el flujo circulatorio.

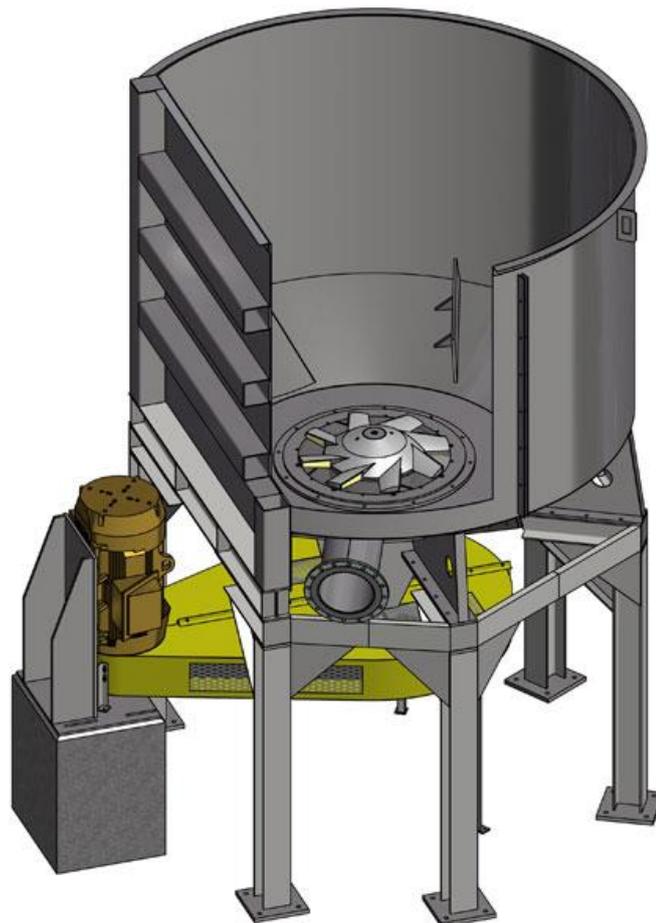


Figura I.3.8: Púlper



Figura I.3.9: Hélice para púlper de alta consistencia, y a la izquierda hélice para baja consistencia.

El accionamiento de la turbina suele realizarse mediante transmisión por correas planas o trapezoidales o por engranajes, con motores de dos o tres velocidades con cambio automático por amperaje.

La extracción de la pasta desintegrada se hace a través de un agujero, o de una plancha perforada, conectados con una cámara de extracción cerrada por una válvula.

En el caso de un púlper de trabajo en continuo no existe la válvula de cierre; el púlper, alimentado con agua y pasta de forma más o menos continua, está conectado a una caja de nivel constante para regular el caudal de salida y el nivel en el púlper.

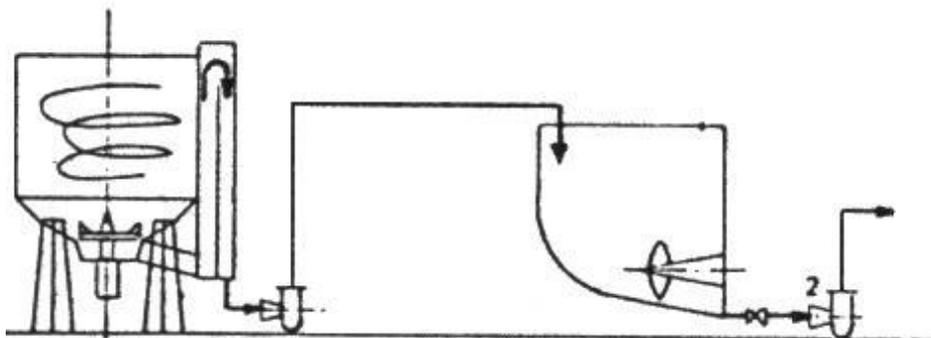


Figura I.3.10: Púlper de trabajo en continuo

La consistencia de trabajo en la desintegración suele ser del orden del 4 - 7 % con rotores convencionales y del 10 - 18 % con rotores helicoidales.

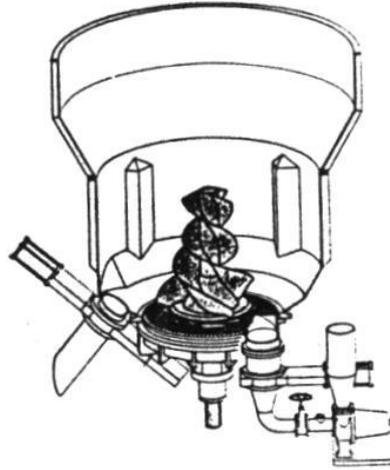


Figura I.3.11: Púlper de alta consistencia

3.6.2.1. Pulperes de alta consistencia de tambor giratorio

Otro método utilizado para desintegrar papelote a alta consistencia y a la vez separar los contaminantes de gran tamaño, es la utilización del púlper de tambor giratorio.

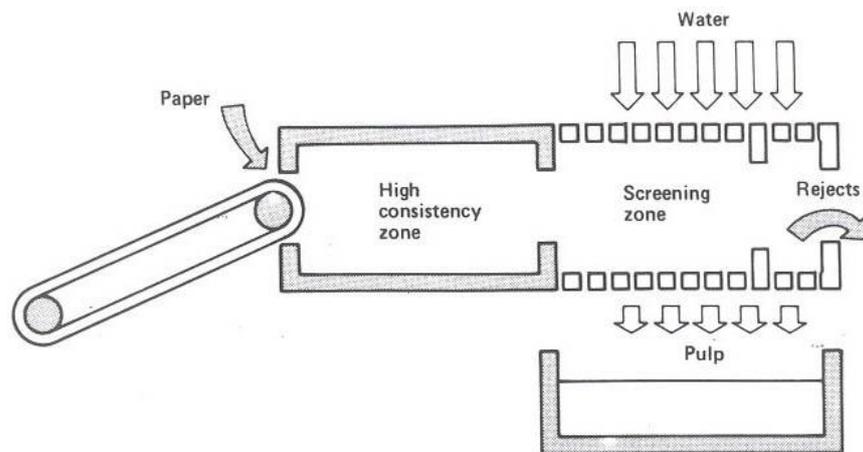


Figura I.3.12: púlper de tambor giratorio

Este púlper es un cilindro de hasta 3 m de diámetro y 17 m de longitud, con su eje ligeramente inclinado respecto a la horizontal, en el que se distinguen dos partes: una zona a alta consistencia (< 15%) en la que se logra la desintegración por choque (unas paletas adosadas a la pared interior del tambor elevan y dejan caer al papel humedecido) y una zona de tamizado en la que se introduce agua para alcanzar el 3 - 5%. La pasta aceptada debe pasar por unas perforaciones de entre 4 y 10 mm y el rechazo se elimina por el extremo opuesto a la alimentación.

3.7. Refinado

El refinado es la operación de preparación de la pasta en la que se modifica, mediante la acción de un trabajo mecánico y en presencia de un medio acuoso, la morfología de las fibras y su estructura físico-química. La operación de refinado se controla mediante un aparato conocido como Schopper-Riegler, el cual se basa en la capacidad de desgote que tiene la pasta, es decir, la velocidad con la que la pasta deja escurrir el agua absorbida. Esta medida se expresa en grados Schopper ($^{\circ}\text{SR}$).

Esta operación tiene por objeto modificar y desarrollar algunas de las características de las materias fibrosas para conferirles las cualidades necesarias para fabricar un papel con unas propiedades determinadas. Dos conceptos básicos que caracterizan la operación de refinado son: la necesidad de dispensar energía a las fibras y que éstas tienen que estar en un medio acuoso. La manera de proporcionar energía a las fibras en el material utilizado en el refinado de pastas es hacer pasar a la suspensión fibrosa entre dos superficies sobre las que existen unas barras o cuchillas.

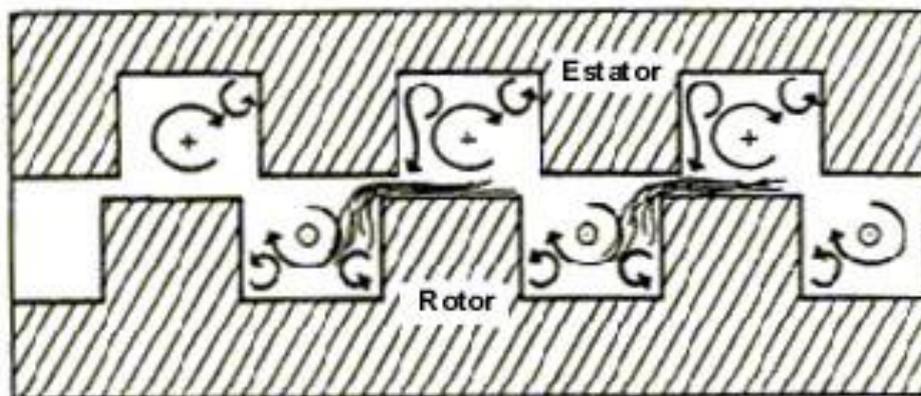


Figura I.3.13: Principio de actuación de las guarniciones de un refinador y flujos en las mismas.



De las dos superficies una es fija (estator), mientras que la otra se desplaza con un movimiento perpendicular al eje de las barras (rotor), de manera que las fibras situadas entre ambas sufren un efecto de cortadura, aplastamiento y fricción entre sí y contra las guarniciones del aparato. La acción conjunta de todos estos esfuerzos mecánicos producirá el refinado de la pasta.

El flujo en el interior de los canales formados por las guarniciones en movimiento es complejo, pero parece estar formado, básicamente, por tres componentes: un flujo primario que va desde el centro hacia el exterior por el rotor y del exterior al centro (retorno) por el estator; un flujo secundario, de tipo vórtice, en el interior de los canales formados por las barras, que está inducido por el movimiento de las mismas y que con el flujo primario provoca un movimiento en espiral; y un flujo terciario a lo largo de las paredes del estator inducido por el flujo primario, pues al ser más importante el flujo en el rotor que en el estator existirá un gradiente de presión del estator hacia el rotor. La combinación de estos tres flujos impone el posicionamiento de las fibras en el refinador y su acumulación sobre las aristas del rotor, punto donde se le transfiere energía de refinado durante el impacto de ambas guarniciones.

En lo que respecta a la modificación de la fibra durante el refinado, a causa del trabajo mecánico se rompen, dislocan y eliminan parcialmente las paredes primaria y secundaria externa de la fibra, lo que permite la penetración del agua en el interior de la misma provocando su hinchamiento y posibilitándose la fibrillación interna (eliminación parcial de los enlaces laterales en la pared secundaria media y consiguiente aflojamiento de la estructura interna de la fibra), a la vez que se realiza la fibrillación externa, al salir las fibrillas de las capas más interiores a través de los agujeros practicados en las capas externas. Debido al conjunto de estos efectos la fibra toma un aspecto deshilachado, aumentándose sensiblemente su superficie y volumen específicos, a la vez que se vuelve más flexible y blanda. Otros efectos producidos son la eventual pérdida de longitud por fractura y la producción de elementos finos, pequeñas partículas arrancadas de las capas externas y fibrillas desprendidas.

Todos estos cambios son los que sistematizaron Higgins y de Yong, estableciendo los conceptos de efectos primarios y secundarios del refinado, así como las relaciones entre unos y otros:

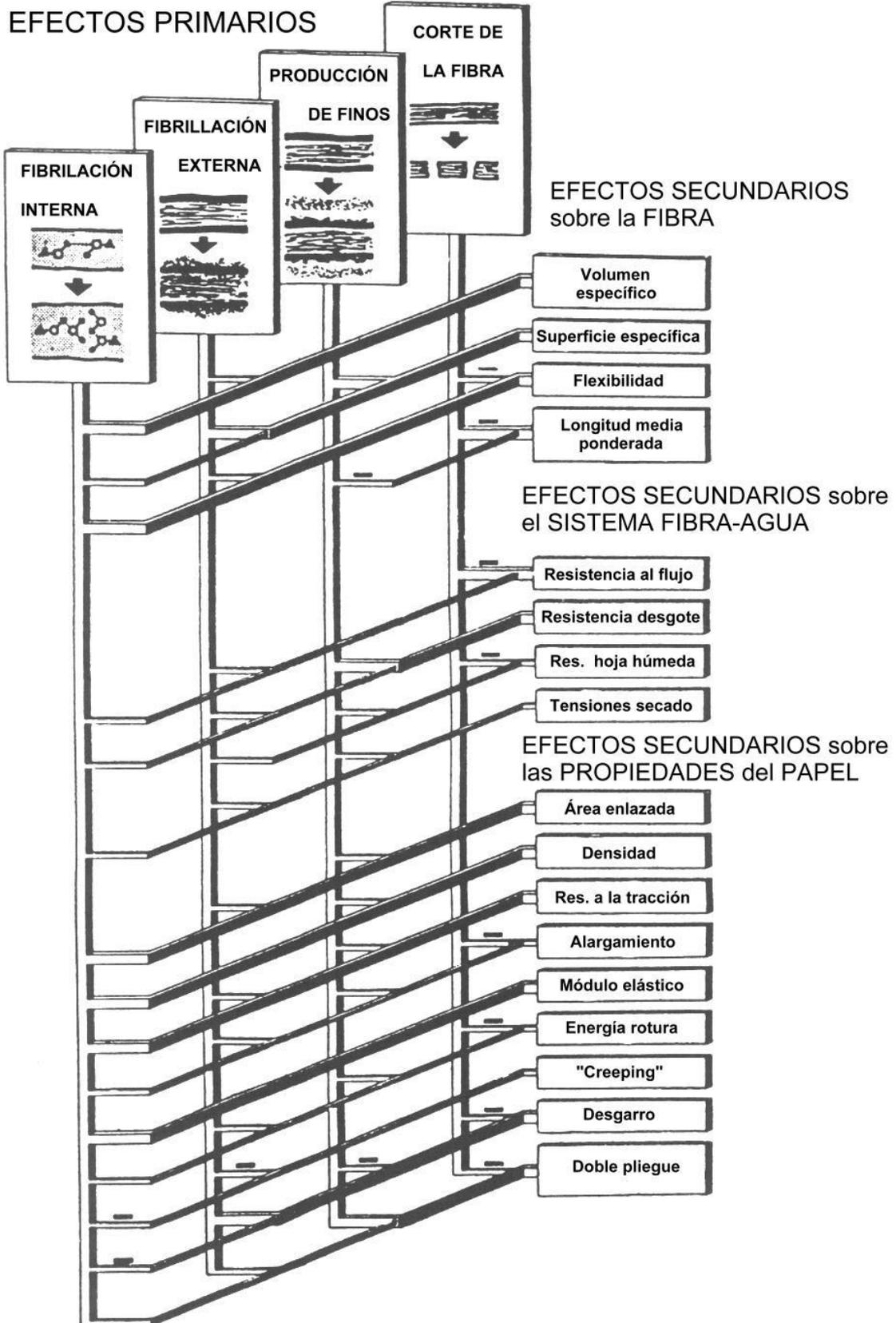


Figura I.3.14: Relación entre los efectos primarios y secundarios en el refinado.



A los cuatro efectos primarios (fibrilación interna, fibrilación externa, producción de finos y acortamiento de la fibra) cabría sumarle la fibrilación molecular, definida como una solubilización parcial de algunos componentes químicos de la pared celular, lo que daría una concentración de hemicelulosas y lignina en las zonas amorfas entre las fibrillas. Para algún autor los tres tipos de fibrilación serían englobados bajo el epígrafe de creación de nuevas superficies, los dos efectos primarios restantes bajo el de creación de nuevas partículas, y consideraría, dentro de la acción de refinado, un tercero epígrafe de modificaciones y/o deterioros estructurales.

Debido a que cada uno de los efectos primarios anteriormente descritos están relacionados con aspectos de la morfología de la fibra, ésta tendrá una gran influencia en el desarrollo de dichos efectos bajo unas condiciones de refinado dadas, por lo que el resultado de un refinado dependerá de las condiciones usadas en el refinador y de la propia morfología de las fibras.

3.7.1. Efectos del refinado

3.7.1.1. *Efectos primarios*

La fibrilación interna supone una rotura de los enlaces puente de hidrógeno existentes primitivamente en el interior de las fibras entre moléculas de celulosa o hemicelulosas, y su transformación en nuevos enlaces entre ellas o con moléculas de agua que ha entrado en el interior de la fibra produciendo el hinchamiento de la fibra. La reorganización de los enlaces se realiza en la fracción amorfa de la celulosa y en las hemicelulosas. Este efecto primario es, quizás, el más importante en cuanto al aumento de las características mecánicas, ya que al eliminarse agua durante el proceso de fabricación se produce una reorganización de los enlaces puente de hidrógeno que se satisfacen, bien con otras moléculas de la misma fibra, bien con moléculas de fibras contiguas, ya que al desaparecer las capas más externas de la fibra durante el refinado no existe ningún impedimento para que esto suceda.

Como consecuencia del desprendimiento de las capas externas de la fibra las microfibrillas dejan de estar empaquetadas, y forman una capa pilosa que rodea la superficie de la fibra (fibrilación



externa), debido a ello se incrementa la posibilidad de formación de enlaces entre fibras contiguas.

La causa principal de la formación de finos es el desprendimiento de las capas externas y de haces de microfibrillas. Debido a la heterogeneidad de tamaño de estas partículas es difícil juzgar la importancia que tienen sobre las propiedades del papel.

El acortamiento de fibras está básicamente generado por la acción directa de las guarniciones, pero también por los flujos a gran velocidad y gradientes de velocidad; la extensión de este efecto depende principalmente del tipo de pasta.

3.7.1.2. *Efectos secundarios*

El incremento del volumen específico está sobre todo relacionado con la fibrilación interna, que causa hinchamiento de la fibra, y de manera no tan acusada con la fibrilación externa, microfibrillas adosadas a la superficie de las capas externas.

La fibrilación externa y la formación de finos afectan primordialmente al aumento de la superficie específica, la fibrilación interna provoca un incremento claramente inferior. La fibrilación interna (rotura de enlaces entre moléculas adyacentes) provoca un aumento de la flexibilidad, y la fibrilación externa (eliminación de parte de las capas externas de la fibra) el acortamiento de fibras (menor esbeltez) influye en sentido negativo.

La longitud media de la mezcla está afectada negativamente por el acortamiento de las fibras y la producción de finos.

El acortamiento de fibras disminuye la resistencia al flujo (disminución de la viscosidad del fluido), la fibrilación externa e interna (incremento de la viscosidad del fluido) tienden a aumentarla ligeramente.

La resistencia al desgote (filtración) viene afectada por la formación de finos (taponamiento) y en menor escala la fibrilación externa e interna, aumento de la viscosidad.

La resistencia de la hoja húmeda tiende a aumentar con el refinado, este incremento, en ausencia de enlaces puente de hidrógeno, es debido al aumento de rozamiento entre fibras y a la tensión superficial por lo que influyen positivamente la fibrilación



externa y la formación de finos y negativamente el acortamiento de finos.

Las fuerzas de tensión superficial juegan un papel importante, particularmente en las primeras etapas de refinado, por lo que la fibrilación externa y la formación de finos contribuyen al aumento de las tensiones durante el secado, la fibrilación interna (plastificación de la fibra resultante de las roturas de uniones internas) originará, al final del secado, tensiones en las zonas de contacto de unas fibras con otras.

En el área enlazada influye prioritariamente la fibrilación interna, y en menor medida la fibrilación externa y la formación de finos.

Como consecuencia de un mayor grado de enlace, debido al compactamiento durante el secado, por la fibrilación interna y el relleno de los intersticios entre las fibras por los elementos finos la hoja incrementa su densidad.

El aumento de la resistencia a la tracción está ligado al del área de enlace y, por tanto, a la fibrilación interna, externa y formación de finos.

Ningún efecto primario tiene individualmente una influencia decisiva sobre el alargamiento. Algunas experiencias indican que tratando con álcalis diluidos las fibras, provocando hinchamiento como la fibrilación interna, se observa un ligero aumento del alargamiento del papel y que refinando fibras previamente tratadas con álcali diluido sigue aumentando el alargamiento, lo que muy posiblemente sea debido a la fibrilación externa. Adicionando finos a una pasta se produce un ligero incremento de este parámetro. Por otra parte, la disminución del tamaño de las fibras reduce el alargamiento, posiblemente debido a que los segmentos más cortos son menos flexibles.

La principal influencia sobre el módulo elástico es la ejercida por la fibrilación interna (enlaces puente de hidrógeno), aunque puede que tengan alguna influencia la fibrilación externa y la producción de finos.

La energía de rotura depende directamente del alargamiento, por lo que viene afectada por los efectos primarios de manera similar a éste.

El "creeping", alargamiento del papel sometido a carga constante, denominándose "creep primario" al que se recupera al eliminar la



carga, equivalente a la recuperación elástica, y "creep secundario" la fracción no recuperable al eliminar la carga, equivalente al alargamiento permanente, viene afectado preferentemente por el movimiento entre fibras más que por la distensión de la matriz sólida, por lo que la fibrilación interna y la externa reducen el deslizamiento.

La resistencia al desgarro tiende a aumentar en las primeras etapas del refinado y posteriormente disminuye rápidamente. Posiblemente la fibrilación externa, que tiende a aumentar la fricción entre fibras contiguas, ejercerá una influencia positiva, mientras que la fibrilación interna y la producción de finos, que tienden a dar una mayor homogeneidad al papel, así como el acortamiento de fibras ejercerán un efecto negativo. Hay que tener en cuenta que al aplicar un esfuerzo de desgarro las fibras deslizan unas sobre otras hasta que son separadas por completo y que además está localizado sobre un punto determinado y no sobre una gran área, por lo que la pequeña concentración de uniones por puente de hidrógeno en este punto no podrá impedir el desgarro, incluso en el caso de esfuerzos relativamente pequeños.

En el caso de la resistencia al plegado la homogeneidad de la hoja del papel ejerce un efecto beneficioso. El principal efecto primario será la formación de finos, relleno de intersticios fibrosos, el acortamiento ejercerá un efecto negativo (sólo tendrá gran influencia en el caso de un corte excesivo) y la fibrilación interna y externa influirán positivamente, aunque en menor escala.

3.7.2. Caracterización del refinado

Para describir la acción de un refinador se suelen utilizar dos conceptos independientes:

- Cantidad de refinado.
- Calidad de refinado.

La cantidad de refinado viene definida por la energía específica neta (conocida como SER, por sus siglas en inglés), cuyas unidades son kWh/t, esto es, la potencia útil absorbida (efectiva) dividida por el caudal másico tratado, y depende de las guarniciones elegidas y del tipo de pasta, tal como se indica en la siguiente figura que muestra los resultados obtenidos en la caracterización de una pasta con un determinado equipo y diferentes guarniciones:

$$E_S = \frac{P_u}{p} \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

$$P_u = P_t - P_0$$

Dónde:

- P_u : potencia útil.
- P_t : potencia total.
- P_0 : potencia en vacío.
- P : caudal másico.

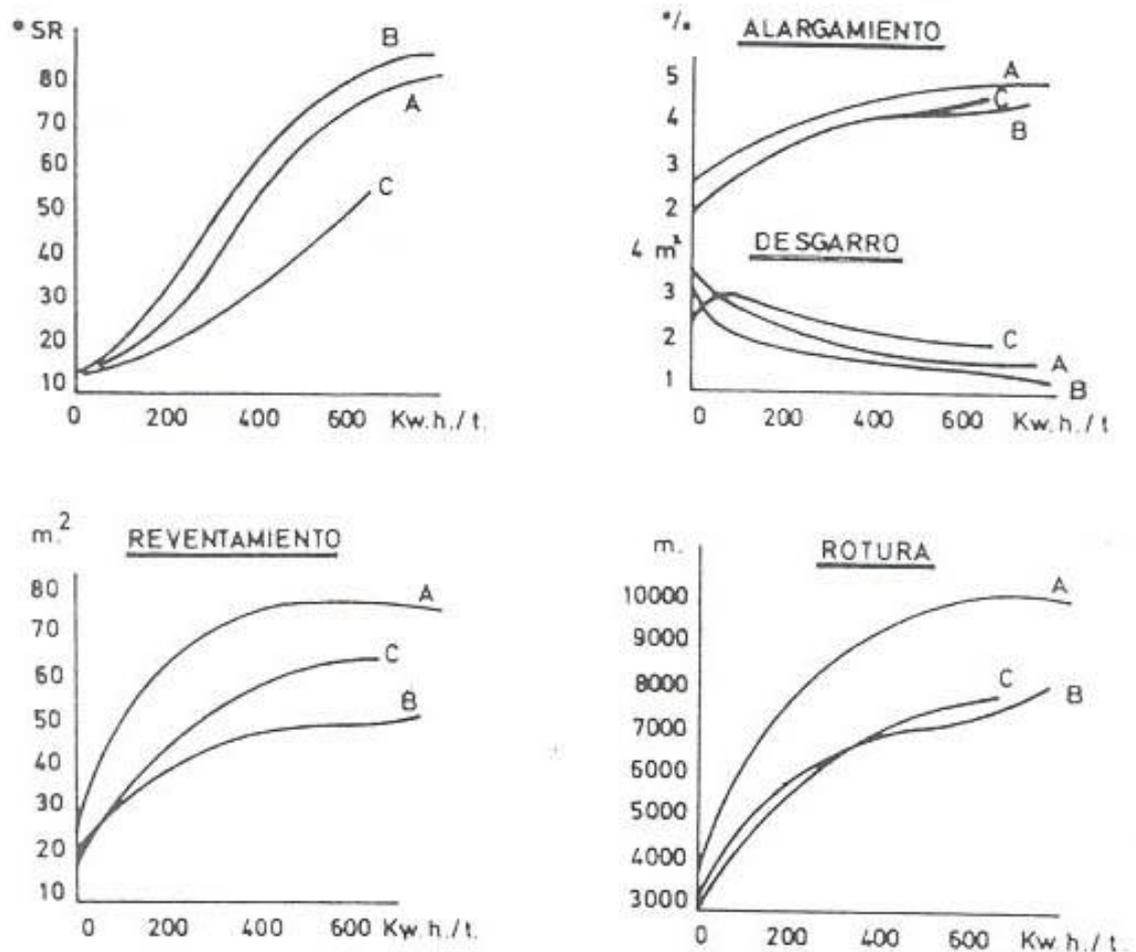


Figura I.3.15: Caracterización del refinado mediante la energía específica

El aspecto cualitativo del refinado está referido a la mayor o menor intensidad a que éste ha sido ejecutado, y se refleja de manera particular en el mayor corte producido a las fibras para una energía

específica dada. Es usual relacionar este aspecto con la denominada carga específica de arista (SEL):

$$B_s = \frac{P_u}{L_c} \left[\frac{J}{m} \right]$$

Donde:

- L_c : velocidad de corte (longitud de arista cortada (CEL) por unidad de tiempo) que viene dada por la expresión:

$$L_c = n * z_r * z_s * l \left[\frac{m}{s} \right]$$

Donde:

- n : velocidad de rotación (rps).
- z_r : número de barras del rotor
- z_s : número de barras del estator,
- m : longitud de la barra

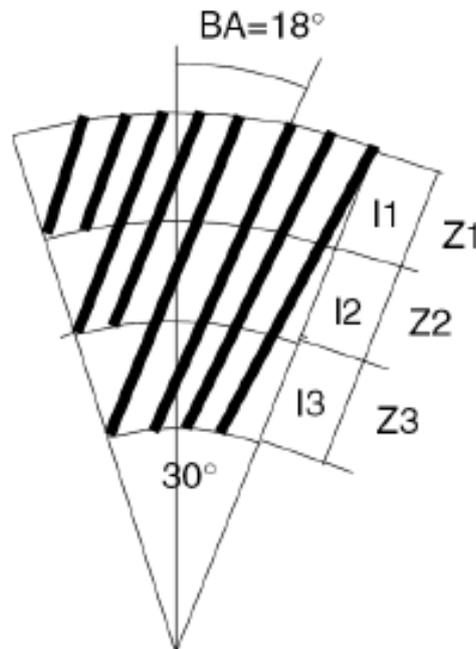


Figura I.3.16: Ejemplo para el cálculo de la longitud de arista cortada, cutting edge length (CEL)

La longitud de arista cortada (CEL) puede calcularse midiendo la longitud de las barras, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$CEL = Z_r * Z_{st} * l$$



Tanto el rotor como el estator están hechos de:

- 4 barras largas de 315mm.
- 2 barras largas de 210mm.
- 2 barras largas de 105mm.

$$I_1 = I_2 = I_3 = 100 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud real de la barra} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{\cos BA}$$

Una vuelta completa significa:

- Zona 1: 96r + 96st barras, de 105mm de largo.
- Zona 2: 72r + 72st barras, de 105mm de largo.
- Zona 3: 42r + 42st barras, de 105mm de largo.

Cálculo de la longitud de giro:

- **Zona 1:**

$$96r * 96st * 0,105m = 967,7 \frac{m}{rev}$$

- **Zona 2:**

$$72r * 72st * 0,105m = 544,3 \frac{m}{rev}$$

- **Zona 3:**

$$48r * 48st * 0,105m = 241,9 \frac{m}{rev}$$

- **Total:**

$$\begin{aligned} & \text{Zona 1} + \text{Zona 2} + \text{Zona 3} \\ &= 967,7 \frac{m}{rev} + 544,3 \frac{m}{rev} + 241,9 \frac{m}{rev} \\ &= 1753,9 \frac{m}{rev} \end{aligned}$$

Para un único disco o refinador cónico:

$$CEL = 1754 \frac{km}{rev}$$

Para un refinador de disco doble:

$$CEL = 3508 \text{ km/rev}$$

Cuanto mayor sea L_c , mayor será el número de impactos de la guarnición contra las fibras y, a potencia constante, más débil será la energía por impacto. Por lo tanto, la carga específica de arista cuantifica la severidad de los impactos recibidos por las fibras.

La experiencia ha demostrado que, con una pasta dada, refinadores con la misma anchura, material y ángulo de barras, trabajando con la misma carga específica de arista, darán pastas con las mismas

características de refinado, permitiendo comparar dos aparatos aparentemente diferentes. B_s depende de la pasta (existe para cada pasta un valor crítico que no conviene sobrepasar), pero permite caracterizar el trabajo de un refinador.

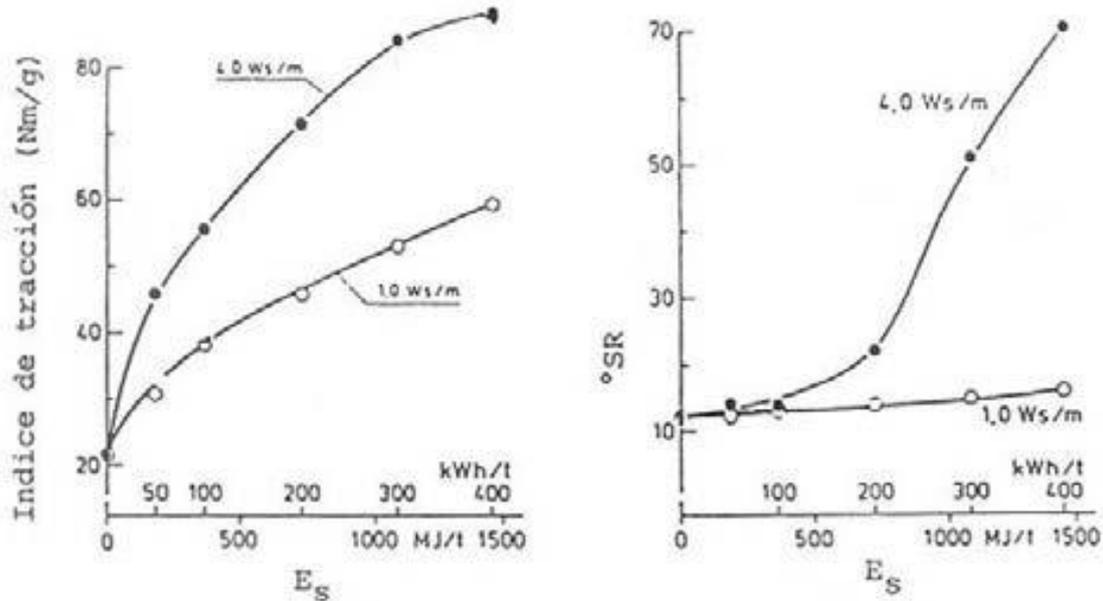


Figura 1.3.17: Índice de tracción (a) y $^{\circ}SR$ (b) vs. energía específica.

En la figura 1.3.17 a la izquierda se representa la diferencia de evolución del índice de tracción frente a la energía específica para dos cargas específicas de arista y a la derecha los valores del $^{\circ}SR$ obtenidos en el refinado. La severidad del refinado a 4 Ws/m hace que para un mismo valor de energía específica el desarrollo de la propiedad física sea notablemente más elevado que para 1 Ws/m. Debe ser también remarcada la ambigüedad del valor del $^{\circ}SR$ con una evolución diferente según sea el valor de B_s y con nula significación en el caso de 1 Ws/m.

En la comparación del índice de tracción con el índice de desgarro del ensayo anterior puede observarse mejor la influencia de B_s .

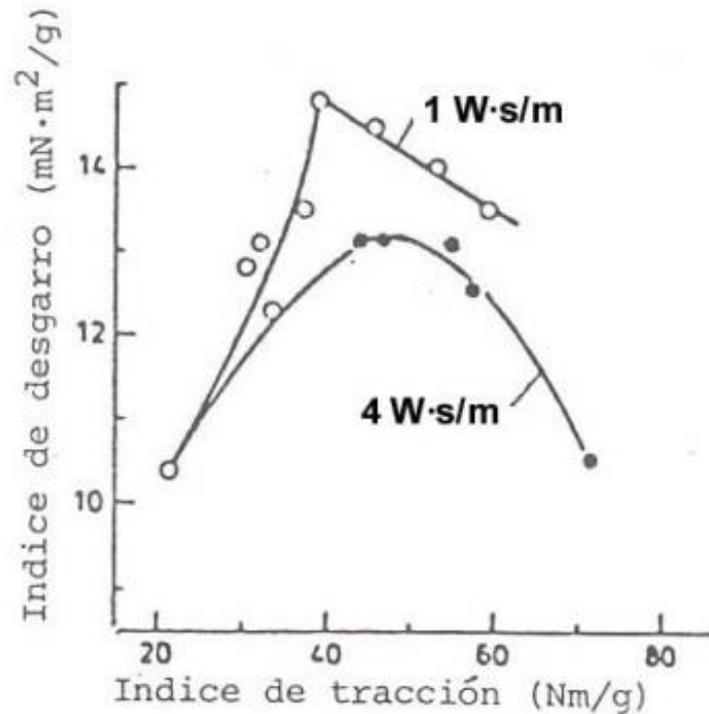


Figura I.3.18: Índice de desgarrado vs. Índice de tracción a dos valores de B_s .

Este hecho pone de manifiesto que la manera clásica de caracterización del resultado de refinado mediante la evaluación del $^{\circ}\text{SR}$ no es buen reflejo del mismo, siendo preferible estudiar en cada caso un par de propiedades críticas relevantes para el caso a estudiar; las dos propiedades críticas pueden ser, además de las ya citadas índice de desgarrado vs. índice de tracción, porosidad vs. índice de tracción, opacidad vs. índice de tracción, etc.

La posibilidad de hacer variar industrialmente el valor de B_s puede ser conseguida, de acuerdo con su definición, mediante dos vías: variando la potencia aplicada o variando la velocidad del refinador (variación de L_c).

La modificación de la potencia aplicada tendrá como consecuencia una modificación bien en la energía específica, o bien en la producción del refinador.

La modificación de la velocidad es la que realmente convierte en independientes los parámetros E_s y B_s , permitiendo encontrar el óptimo de las propiedades buscadas.

La teoría de carga específica de arista no tiene en cuenta el material ni la anchura, y ángulo de las barras de las guarniciones, parámetros que pueden tener una gran importancia para el resultado del refinado. Es debido a ello que se ha propuesto una teoría de la carga específica superficial o intensidad del impacto [$W\cdot s/m^2$] en la que se reflejaría la acción sufrida por las fibras sometidas a los esfuerzos durante el paso de una barra por encima de la otra.

Lumiainen desarrolló la teoría específica de carga arista suponiendo que la energía se transfiere a los haces de fibras durante la breve fase de contacto de las barras. En consecuencia, presentó su definición de la intensidad de refinado como carga específica de superficie (SSL - specific surface load-) que se obtiene dividiendo la carga específica de arista ($SEL = B_s$) por el factor de ancho de la barra -impact length (IL):

$$SSL = \frac{w_r + W_{st}}{2} * \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Donde:

- W_r : ancho de las barras del rotor (m).
- W_{st} : ancho de las barras del estator (m).
- A : ángulo de intersección promedio ($^\circ$).

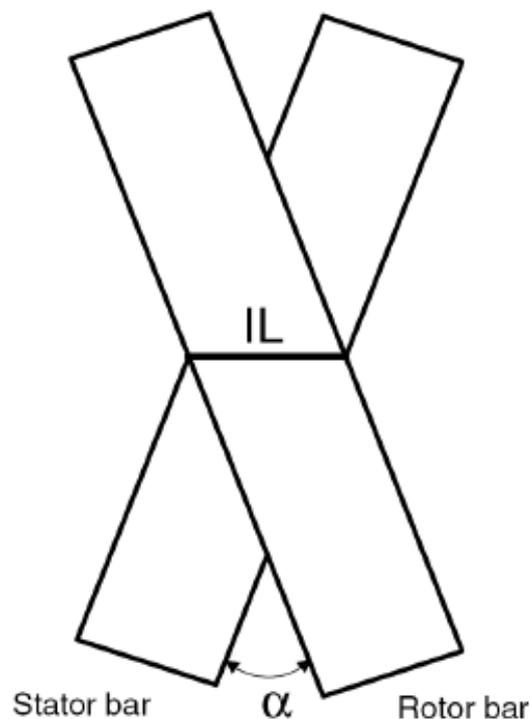


Figura I.3.19: Ejemplo para la determinación de IL



$$IL = \frac{Wr + Wst}{2} * \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

Donde:

- IL: longitud de impacto.
- Wr: anchura de la barra del rotor.
- Wst: anchura de la barra del estator.
- α : ángulo de intersección.

La cantidad de refinado (energía neta) es el resultado del número y contenido de energía (carga específica de arista) de los impactos de refinado, de la naturaleza del refinado -resultado de la intensidad (carga específica de superficie)- y de la longitud de los impactos de refinado. Mediante la combinación de los cuatro factores anteriores, la cantidad de refinado, o energía específica de refinado (SRE), se convierte en el resultado de tres factores y se obtiene multiplicando el número, la intensidad y la duración de los impactos de refinado:

$$SRE \left[\frac{kJ}{kg} \right] = IN \left[\frac{km}{kg} \right] * IL[m]$$

El número de impactos de refinado (IN) se obtiene dividiendo la velocidad de corte (número de impactos generados) por el flujo másico de fibra (M), esta cifra sólo informa del número de impactos generados cuando un caudal másico de fibra dado pasa a través del sistema, no dice cómo las fibras han recibido los efectos de refinado:

$$IN = \frac{L_s}{M}$$

Donde:

- IN: número de impactos de refinado [km/mg].
- Ls: velocidad de corte de las barras [km/s].
- M: caudal másico de fibra [kg/s].

La teoría de carga específica de superficie parece funcionar bastante bien cuando las barras son tan estrechas como los flóculos de fibra que cubren todo el ancho de la superficie de la barra cuando reciben el impacto de refinado. Sin embargo, hay que recordar que la naturaleza del refinado depende tanto de la carga específica de superficie como de la anchura de las barras. Si las barras son mucho más estrechas que el flóculo de fibra, las fibras serán, en gran medida, cortadas. La



teoría de carga específica de arista funciona bastante bien con guarniciones gruesas cuando las barras son más anchas que la longitud de los flóculos de fibra.

Esta nueva aproximación deja, sin embargo, sin tener en cuenta el estado de floculación de las fibras durante la acción de refinado, para el que algunos autores reclaman gran importancia.

Otra teoría desarrollada por Kerekes (C-factor) también parte de que la energía efectiva de refinado puede estar directamente relacionada con el número de impactos y el contenido de la intensidad o energía de cada impacto:

$$E = N * I$$

El autor desarrolló el "C-factor", que representa la capacidad del refino de imponer los impactos sobre las fibras que pasan por él. El C-factor se vincula con la potencia de entrada (P) y el caudal másico de pasta (F), a través de la media (N) y la intensidad (I) de los impactos sobre las fibras. N e I se derivan de las relaciones:

$$N \text{ (número de impactos)} = \frac{C - \text{factor}}{F \text{ (flujo masico)}}$$

$$I \text{ (intensidad o energía de impacto)} = \frac{P \text{ (potencia neta)}}{C - \text{factor}}$$

El C-factor es función de la geometría de las guarniciones, la velocidad de rotación, la consistencia, la longitud de la fibra y su masa lineal.

Para un refinador del disco en un caso simplificado (pequeño tamaño de entrehierro, diseño de barras similar en el rotor y estator), C-factor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = 8\pi^2 * G * D * \rho * Cf * Ln^3\omega * (1 + 2tan\Phi) * \frac{R_2^3 - R_1^3}{3\omega (l + D)}$$

Para un refinador cónico en un caso simplificado, el C-factor se da como sigue:

$$C = 8\pi^2 * G * D * \rho * Cf * Ln^3\omega * (1 + 2tan\Phi) * \frac{L * R_1^2 + L^2 * R_1 * sen \Phi + \left(\frac{L^3}{3}\right) * sen^2\Phi}{\omega (l + D)}$$



Debido a que en las ecuaciones anteriores el C-factor no tiene en cuenta la anchura de las barras hay otra ecuación del C-factor para un caso de refinador de disco simplificado de la siguiente manera:

$$C = 8\pi^2 * \rho * Cf * l * D * G * \omega * \cos^2 \Phi * (\cos \Phi + 2\text{sen}\Phi) \\ * \frac{R_2^3 - R_1^3}{3\omega (l + D)(G + W)^3}$$

Donde:

- N es el número de impactos / pasta de masa [kg⁻¹].
- F caudal másico de pasta a través del refino [kg/s].
- I energía del impacto [J].
- P potencia neta aplicada al refino [W].
- G ancho de las ranuras [m].
- D profundidad de las ranuras [m].
- ρ densidad del agua [kg/m³].
- Cf consistencia de la pasta (expresado como fracción).
- l longitud de la fibra [m].
- n número de barras del rotor y el estator en el círculo en el refino
- ω la velocidad de rotación del refinador [revoluciones/s].
- φ ángulo de la barra desde el radio [grados].
- R1 radio interior de la zona de refinado [m].
- R2 radio exterior de la zona de refinado [m].
- W masa lineal de la fibra de [kg/m].
- θ ángulo del refinador cónico [grados].
- L longitud de la zona de refinado [m].
- W ancho de la superficie de la barra [m].

El C-factor es la más rigurosa y exhaustiva de las teorías desarrolladas hasta la fecha y, en esencia, se basa en otras teorías de refinado bien conocidas, por ejemplo, la carga específica de arista y la carga específica de superficie. Parece muy conveniente cuando se comparan refinadores con unas condiciones dadas, pero el desgaste de las guarniciones, por ejemplo, pueden afectar al C-factor. Debido a que estos factores no son siempre fáciles de determinar y los relativamente complicados cálculos requeridos, esta teoría no es muy utilizada por los fabricantes de papel.

3.7.3. Refinadores

Los diferentes tipos de refinadores pueden ser divididos en tres familias: cilíndricos, cónicos y de discos.

Los cilíndricos, es decir aquellos en el que el rotor es un cilindro sobre el que se apoyan pequeñas platinas estáticas, comprenden la pila holandesa, el refinador Strecker y el Vargo. De toda la categoría puede decirse que su aplicación industrial en la actualidad es mínima.

Las pilas holandesas están constituidas por una cuba de forma alargada y extremos redondeados, dividida por un muro central en dos canales; en uno de los canales se encuentra el molón -cilindro sobre cuya superficie lateral, y paralelas a la generatriz, van montadas las barras y cuyo eje puede desplazarse verticalmente- y debajo de él la platina -juego de barras firmemente sujetas al fondo de la pila-, detrás de este conjunto se encuentra una elevación del fondo y declive posterior para ayudar a la circulación de la pasta durante el refinado. El funcionamiento de este refinador es en discontinuo, tras la introducción de la suspensión fibrosa se pone en marcha el motor que acciona el molón, lo que hace que la pasta se desplace por los canales de la pila (acción de bombeo generado por los alvéolos entre barras) y se procede a ejercer una fuerza sobre el eje para acercar las barras del molón a las de la platina; transcurrido el tiempo necesario para alcanzar el refinado deseado -que dada la lentitud del aparato puede seguirse sacando muestras de pasta- se levanta el molón y se descarga la pasta.

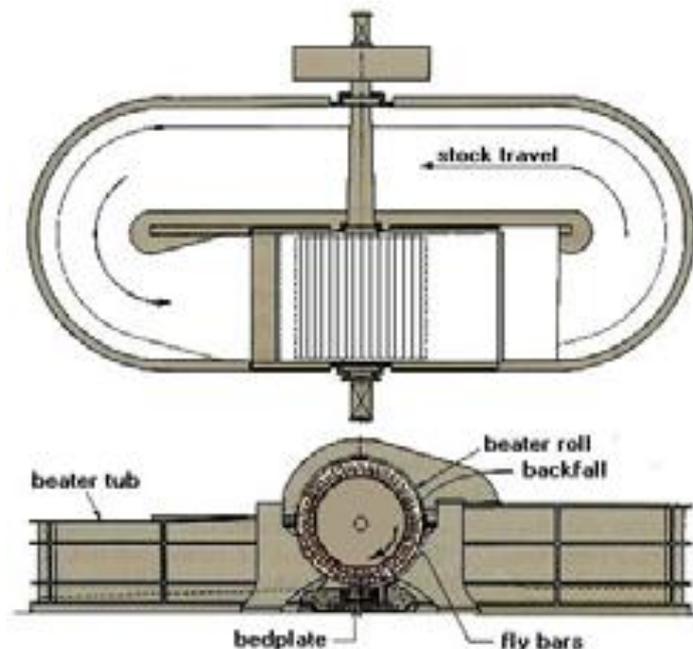


Figura I.3.20: Pila holandesa

El refinador Strecker está formado por un molón cilíndrico sobre cuya superficie se encuentran dispuestas paralelamente las barras; el molón gira en el interior de una carcasa cilíndrica en las que se encuentran alojadas varias platinas guarnecidas de barras y provistas de un movimiento radial que permiten variar el entrehierro con el molón. La entrada de la pasta se hace por un extremo de la carcasa, circula entre las guarniciones y se descarga por el otro extremo de la carcasa; al no haber efecto de bombeo, este desplazamiento debe asegurarse mediante una bomba.

El refinador Vargo está formado por un rotor cilíndrico hueco sobre el que se apoyan unas platinas formadas por unas planchas perforadas que tienen un mecanismo para graduar la presión que ejercen sobre el molón. La pasta se introduce por el interior del rotor y es forzada a pasar entre las superficies en movimiento de rotor y estator antes de ser descargada a una cavidad periférica; debido a las perforaciones existentes en las planchas de las platinas, que permiten la evacuación del agua y los elementos finos, la acción de refinado sobre las fibras se realiza a consistencia elevada.

Los refinadores cónicos están formados por un rotor en forma de tronco de cono que gira en el interior de una carcasa o estator también cónica, sobre las superficies de ambos se alojan las barras pudiéndose variar el entrehierro por desplazamiento del eje del rotor mediante un sistema de ajuste. La entrada de la pasta se hace por el extremo de la carcasa de menor diámetro, circulando entre las guarniciones (efecto de bombeo) y descargándose por el extremo de la carcasa de mayor diámetro. Los refinadores cónicos pueden ser clasificados en cónicos de pequeño ángulo y de gran ángulo.

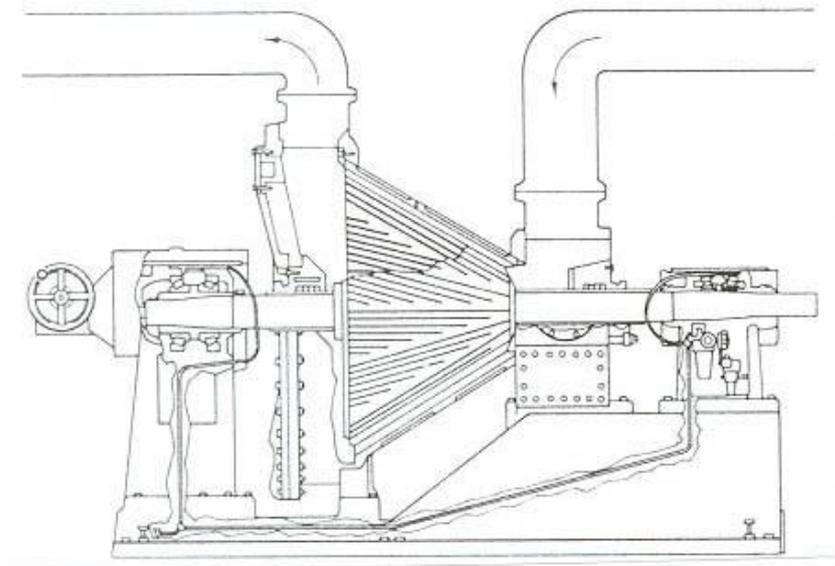


Figura I.3.21: Refinador cónico de gran ángulo.

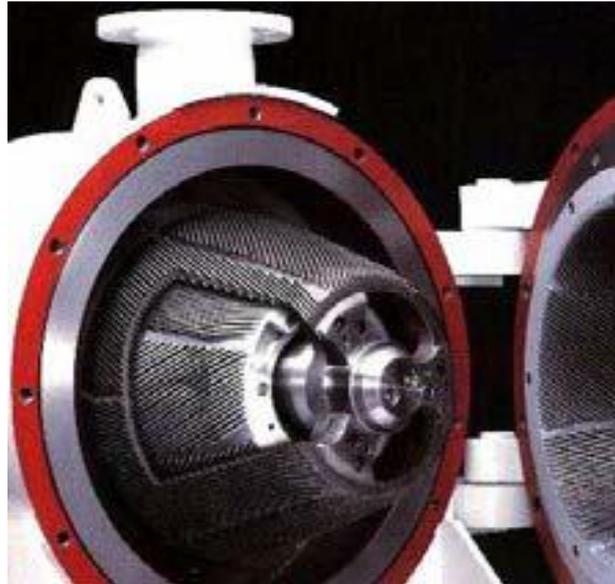


Figura I.3.22: Refinador cónico de pequeño ángulo.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, los de gran ángulo oscilan entre el 55 - 70% y los modernos de pequeño ángulo entre el 70 - 85%. Los datos típicos para el refinado de pasta química en estos últimos se dan en la siguiente tabla:

Tabla I.3.4: Datos típicos en refinadores de pequeño ángulo

	Resinosas	Fronzosas
Ancho de barra (mm)	3,5 - 5,5	2 - 3
Intensidad Bs (J/m)	0,9 - 6	0,3 - 1,5
Intensidad SSL (J/m ²)	250 - 1000	150 - 500
Consistencia (%)	3,5 - 4,5	4 - 6

Los refinadores de discos están formados por discos (rotatorios y estacionarios) sobre cuyas superficies se disponen barras. Uno de los discos es giratorio, graduándose el entrehierro por desplazamiento del disco estacionario, y debiendo pasar la pasta radialmente entre ambas superficies desde el interior hacia la periferia, por lo que existe un efecto de bombeo.

Algunos tipos de refinadores de discos permiten trabajar a consistencia media (10-20%) o elevada (hasta el 35%), en este caso deberá espesarse previamente la pasta e introducirla en el interior del

aparato mediante un husillo que permita el trasiego de pasta en estas condiciones.

Entre los refinadores de discos pueden distinguirse los monodisco, utilizados principalmente para el refinado a media y alta consistencia, doble disco y multidisco, con eficiencias del orden de 50 - 75% para los monodiscos y de 60 - 85% para los últimos.

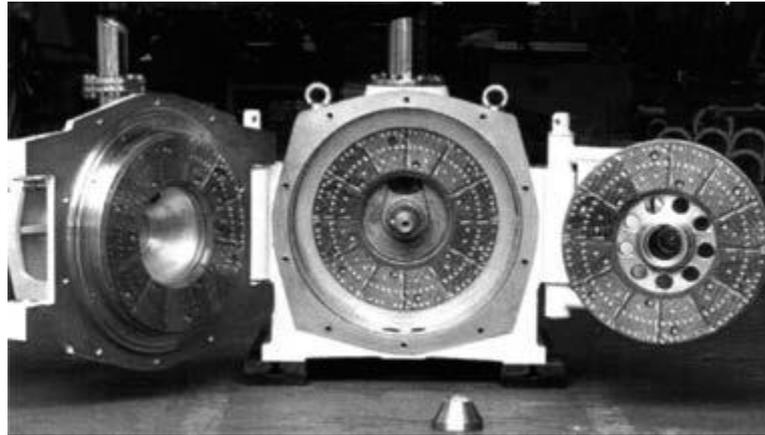


Figura I.3.23: Refinador de discos.

Los datos típicos para el refino de pasta química a baja consistencia en refinadores de doble disco se dan en la siguiente tabla:

Tabla I.3.5: Datos típicos en refinadores de discos

	Resinosas	Fronzosas
Ancho de barra (mm)	3 - 5	1,5 - 3,5
Intensidad Bs (J/m)	1,7 - 4,5	0,5 - 1,5
Intensidad SSL (J/m ²)	370 - 720	180 - 360
Consistencia (%)	3,5 - 4,5	4 - 5,5

La siguiente tabla es un ejemplo en el que se relaciona velocidad del refinador con las consistencias de refinado para pastas kraft de resinosas. A medida que aumenta la consistencia también aumenta la velocidad de circulación (velocidad periférica a la salida).



Tabla I.3.6: Velocidad de refinación en función de la consistencia para pastas Kraft de resinosas

	Baja	Media	Alta
Consistencia	3,5 – 5,5	10 – 20	30 – 35
Velocidad periférica (m/s)	15 – 25	40 – 50	90 – 110

3.7.4. Variables en la operación de refinado

Para conseguir un papel de unas propiedades determinadas, se pueden utilizar diferentes valores de una serie de variables, que pueden ser clasificadas en distintos apartados, tal como se muestra en la tabla I.3.7:

Tabla I.3.7: Variables en la operación de refinado

Variabes de las fibras	Variabes de proceso controladas	Variabes de proceso activas	Variabes de proceso pasivas
Tipo de fibra	Caudal	Entrehierro	Geometría de la guarnición
Tipo de pasteado	Consistencia	Velocidad de rotación (sólo en algunos casos)	Material y microestructura de la barra
Rendimiento	pH		Dirección de rotación
Blanqueo	Temperatura		Velocidad de rotación
Secada / no secada	Presión		

3.7.4.1. Variables de las fibras

Dentro del tipo de fibra podría decirse que los niveles en los que nos podemos mover son prácticamente infinitos: fibras largas, cortas, diferentes especies, etc., que asociado a los distintos tipos de pasteado pueden hacer que, manteniendo todos los otros parámetros constantes, se puedan alcanzar resultados marcadamente diferentes. En los casos particulares de las fibras recicladas y de alto rendimiento (50 - 85%) las altas intensidades de refinado (altos valores de Bs) tienden a incrementar la formación de finos. En particular el incremento de rendimiento reduce la aptitud al refinado desde el punto de vista del aumento de propiedades de resistencia. El contenido en lignina y de hemicelulosas de una pasta afectará al desarrollo del refinado en



sentidos opuestos. Otro factor que afecta a la operación es el secado previo de la pasta que tiende a cerrar los microporos existentes en la pared fibrosa y a la formación de enlaces puentes de hidrógeno en la parte amorfa de la fibra, este efecto es más notable en el caso de las pastas recicladas que han sufrido un secado más intenso en la anterior fabricación del papel que el relativamente suave de las fábricas de pasta.

3.7.4.2. *Variables de proceso controladas*

Dentro de este apartado se engloban todas las variables del proceso externas al refinador y que se pueden mantener bajo estrechos márgenes mediante los correspondientes lazos de control.

Mediante la pareja de variables caudal-consistencia se mantendrá un determinado valor de caudal másico mediante el que se regulará la energía específica de refinado.

La influencia de la consistencia sobre la operación de refinado ha sido verificada extensamente. El tratamiento a consistencia elevada parece comportar una interacción considerable entre fibras, por lo que la deformación sufrida por las mismas es menor que en el refinado a baja concentración, lo que se traduce en una mayor longitud de la fibra tratada, una menor formación de finos y una posible mayor área de enlace, por lo que, por ejemplo, se puede obtener mayor desgarrado para la misma tracción. Otra característica es que las fibras refinadas a alta consistencia se presentan plegadas, onduladas y torcidas, lo que confiere un aumento del alargamiento en el papel con ellas fabricado. Por otra parte, la suavidad del refinado a alta concentración ha sido puesta de manifiesto por el diferente tipo de desgaste de las barras, uniforme en el caso de alta consistencia y basto para la baja.

Dado que las diferentes consistencias de refinado producen diferentes efectos en las fibras la selección de la consistencia depende del objetivo buscado:

- **Refinado a media consistencia:**

Suele ser más conveniente para las fibras recicladas y tratamientos de rechazos en los procesos de fabricación de pasta. En este sistema las fibras son bombeadas a una consistencia aproximadamente del 4% a un espesador y de allí, por medio de un alimentador de tornillo, se alimentan al 10% - 20% de consistencia a un refinador de un solo disco. Los resultados indican que el refinado al 10% -12% da fibrillación interna y se hincha las fibras, mientras que el refinado al 15% -



20% provoca rizo y microcompresiones en la fibra. A medida que aumenta la consistencia, la fibrillación interna de las fibras disminuye. Los resultados del refinado a media consistencia están entre los resultados de baja y de alta consistencia.

- **Refinado a alta consistencia:**

Al 30% -35% se utiliza generalmente cuando el producto final debe tener alta absorción de energía a la tracción y alta porosidad (baja resistencia al aire). Un producto típico refinado a alta consistencia es el papel kraft para sacos, porque los sacos se llenan con polvo (por ejemplo, cemento) y deben ser lo suficientemente resistentes y a la vez permitir la salida de aire a través de las capas de papel. Como el refinado a alta consistencia crea rizado/curvado de las fibras y baja capacidad de enlace, la etapa de alta consistencia debe ser seguido por etapas de refinado a baja consistencia para enderezar las fibras e incrementar la capacidad de unión.

El pH en la operación de refinado afecta a la posibilidad de hinchamiento de la fibra, por lo que valores de pH ácidos o fuertemente alcalinos pueden ocasionar disminuciones en las propiedades mecánicas respecto a las encontradas refinando a pH ligeramente alcalino. Por otra parte, el requerimiento energético de la operación es superior cuando se trabaja a valores bajos (pH 4 - 4,5) que a pH 7.

El aumento de la temperatura afecta negativamente al refinado, salvo en las pastas de alto rendimiento en las que se utiliza el refinado a temperatura elevada debido a las propiedades viscoelásticas de la lignina. La influencia de este parámetro parece debida principalmente al hinchamiento de las fibras (inhibido por la temperatura), teniendo menor importancia otros efectos como el incremento de la solubilidad de los componentes de la célula. Esta variable no se controla debido a que los costos de regulación serían muy elevados.

3.7.4.3. *Variables de proceso activas*

Estas variables son las que el operador puede modificar con facilidad para proporcionar a la pasta la energía mecánica precisa. La modificación de la energía específica se hace variando la separación entre las guarniciones, sin embargo, al no poderse variar la velocidad en la mayoría de los refinadores, no se podrá efectuar la regulación de carga específica de arista.



3.7.4.4. Variables de proceso pasivas

Es precisamente en este apartado en el que cabe esperar más juego para diseñar un tratamiento específico a la pasta, que determine las propiedades que se quieren en un papel determinado. De entre ellas cabe resaltar las que están ligadas a la geometría de la guarnición, pero desgraciadamente no existe suficiente bibliografía disponible al respecto.

Para una carga específica de arista dada, guarniciones con barras estrechas y ranuras anchas proporcionan corte y un mínimo incremento en la resistencia al desgote, mientras que barras anchas y ranuras estrechas dan corte mínimo y un rápido incremento de la resistencia al desgote. En las tablas siguientes se muestran dimensiones típicas para refinadores cónicos y de discos.

El ángulo entre las barras del rotor y estator tiene una gran influencia en el consumo energético y en el desarrollo de propiedades físicas. Se ha encontrado que un ángulo de intersección de aproximadamente 36° para fibras largas, y de aproximadamente 20° para fibras cortas son energéticamente más eficientes y proporcionan las mejores relaciones entre resistencias al desgarrar y a la tracción. Raras veces se colocan resaltes -nervios de retención-entre las barras cuando se refinan pastas químicas, pero son ampliamente usadas cuando se refinan rechazos de pasta en las fábricas de pasta.

Tabla I.3.8: Guarniciones para refinadores cónicos

	Resinosas	Fronzosas
Ancho de barra (mm)	3,5 - 5,5	2 - 3
Ancho de ranuras (mm)	4,5 - 7	2,5 - 3,5
Profundidad ranuras (mm)	10	7

Tabla I.3.9: Guarniciones para refinadores de disco

	Resinosas	Fronzosas
Ancho de barra (mm)	3 - 5	1,5 - 3,5
Ancho de ranuras (mm)	3 - 5	1,5 - 3
Profundidad ranuras (mm)	7	5

3.7.5. Circuitos de refinado

Los circuitos de refinado pueden tener diferentes diseños en función de tamaño de la planta, adecuación a las distintas calidades a fabricar, pastas disponibles, etc. A partir de estos se determinará la consistencia de refinado, el diseño de las barras de las guarniciones necesarias para dar el refinado requerido, el requerimiento de energía neta, y el número de etapas de refinado recomendado (número de refinadores en serie). Tras este dimensionamiento se seleccionarán el tamaño, la velocidad de rotación y la potencia de los refinadores para cumplir con la capacidad, la energía neta, y los requisitos de intensidad de refinado de los diferentes productos finales. Debido a que el comportamiento de refinado de la pasta depende de muchos factores (especies de madera, longitud de la fibra, masa lineal de la fibra, método de blanqueo, blancura, viscosidad, etc.) el dimensionamiento del sistema de refinado es complejo y si las pastas no son bien conocidas deben ser analizados estos factores, incluyendo ensayos de refinados en laboratorio, a escala piloto e, incluso, con maquinaria a escala de fábrica.

Una clasificación clásica es la que diferencia entre circuito único o separados para los diferentes tipos de pastas. Independientemente del sistema de refinado principal puede haber un refinador de corte después de la tina de mezcla para homogeneizar la mezcla de fibra y para una mejor formación de la hoja -reducción de tamaño de fibras demasiado largas- o reacondicionamiento las fibras de de la línea de reciclado interno.

En el caso del circuito único la suspensión mezcla de las diferentes pastas que han sido dosificadas en la etapa de desintegración se refinan al mismo tiempo, recibiendo todas las fibras el mismo tipo de tratamiento:

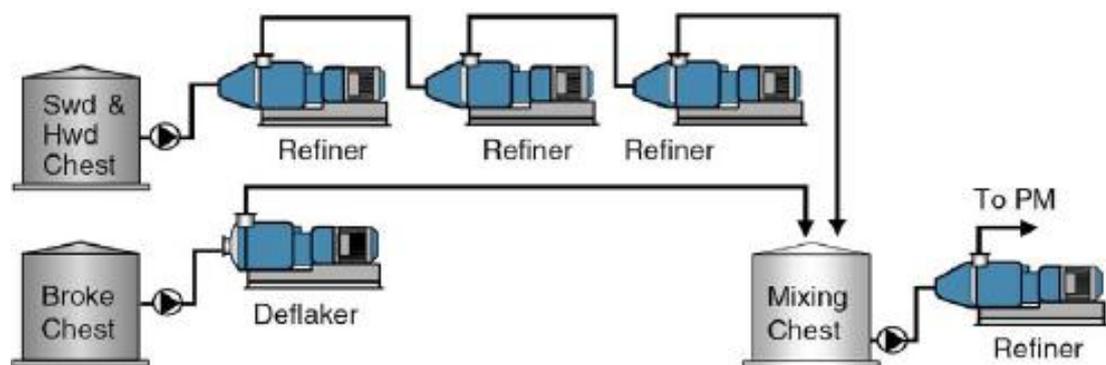


Figura I.3.24: Circuito de refinado único

En el caso de circuitos separados existirá una línea de refinado para cada tipo de pasta (por ejemplo, una línea para la fibra corta y otra para la larga), realizándose en los circuitos de cabeza de máquina la dosificación y mezcla.

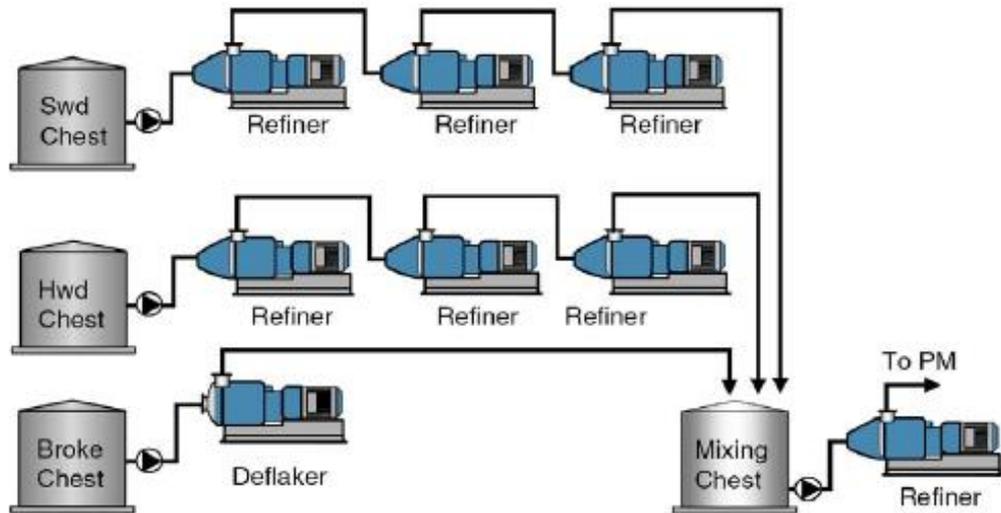


Figura I.3.25: Circuito de refinado separado.

La ventaja es poder ajustar cada línea a las características que se desean desarrollar en cada tipo de fibra, pero con el inconveniente de una mayor inversión y, en el caso de fábricas de pequeña producción, no obtener un rendimiento productivo elevado del equipo de refinado.

Otra posible clasificación, atendiendo a la forma de llevar a cabo el proceso, es la de discontinuo o continuo. En el caso de fábricas relativamente pequeñas y/o que comporten variaciones en el tipo de refinado la opción es el refinado en discontinuo o semicontinuo, que con una correcta automatización permite obtener, prácticamente, el mismo comportamiento que un proceso en continuo.

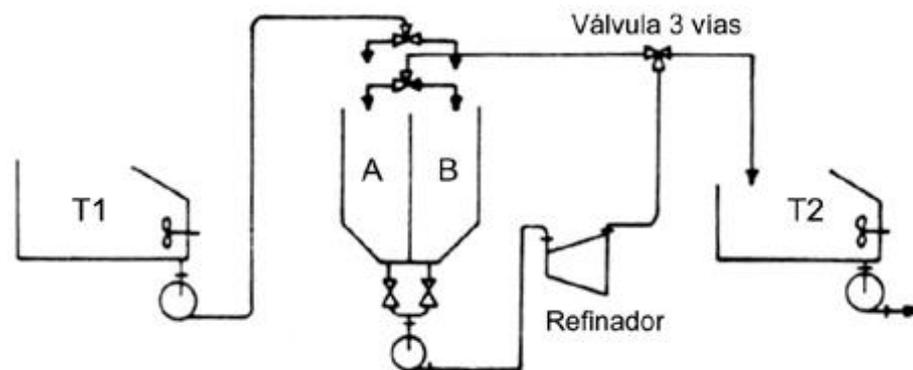


Figura I.3.26: Circuito de refinado con tinas ciclizadoras.

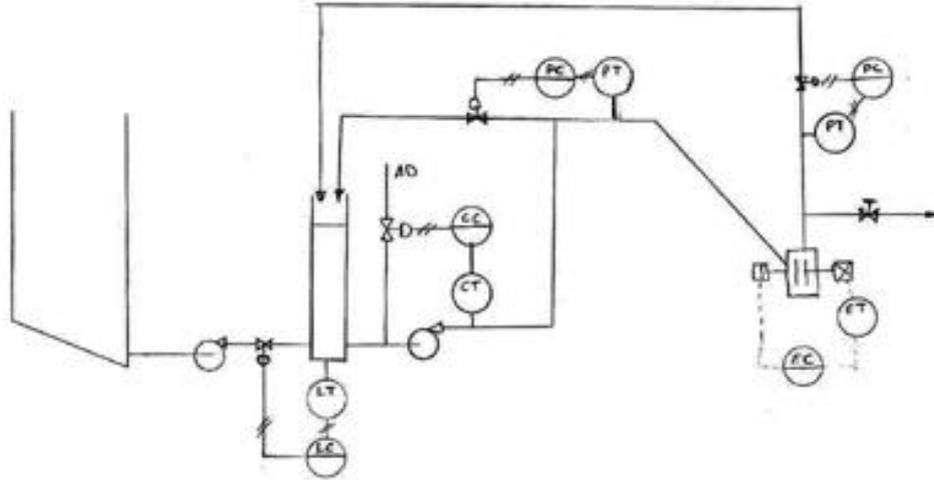


Figura I.3.27: Circuito de refinado con recirculación.

Otro caso particular es el circuito de refinado de alta consistencia, en que esta etapa debe ser seguida por etapas de refinado a baja consistencia para enderezar las fibras e incrementar la capacidad de unión.

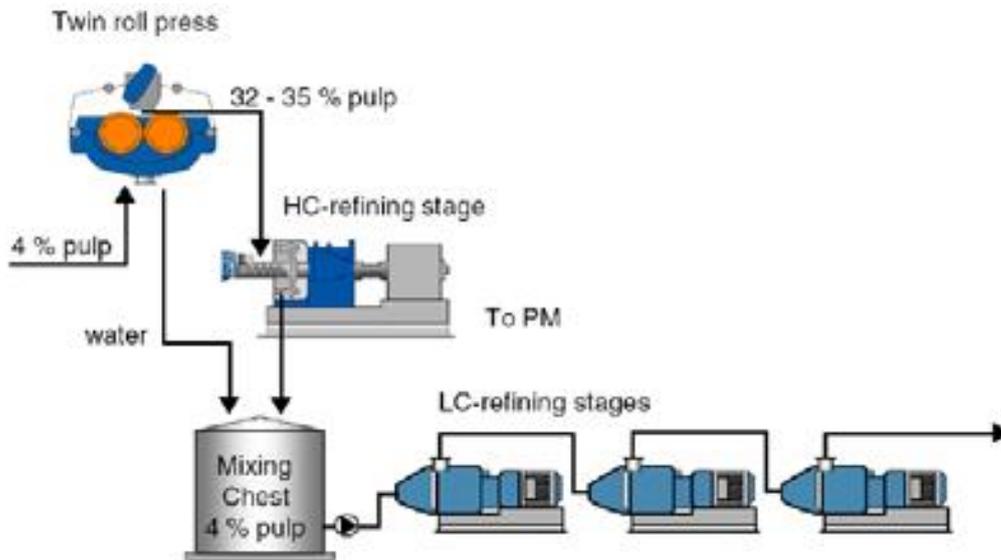


Figura I.3.28: Circuito de refinado

3.7.6. Control del proceso de refinado

El control del refinado comprende dos campos diferentes: la medición y control de parámetros del refinador y el control sobre la suspensión fibrosa. Dentro del primer campo se engloban aquellos parámetros

fácilmente medibles y que permiten fijar puntos de consigna respecto a Es y Bs.

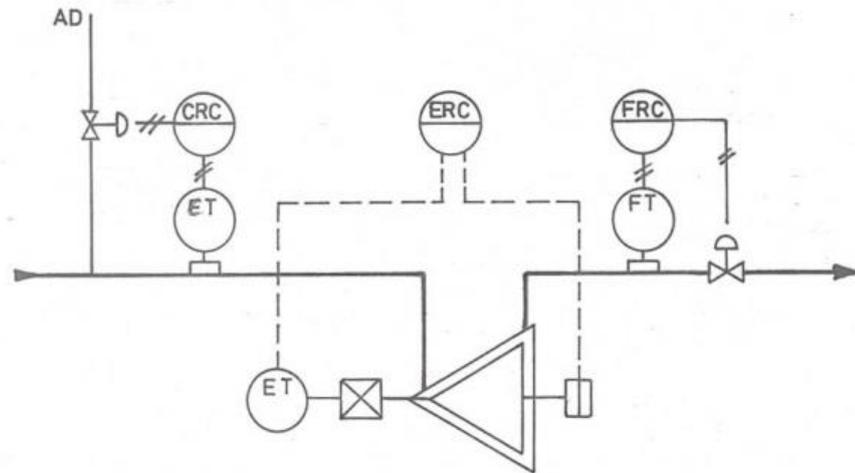


Figura I.3.29: Esquema de regulación de Es en un refinador

En la figura anterior se representa un esquema clásico de regulación de Es mediante el ajuste de la separación de las guarniciones con lazos de control independientes para el control del caudal y consistencia. El esquema de la siguiente figura rige el mismo principio, aunque en este caso al poder variarse la velocidad de giro del refinador se independizará el control de Es y Bs.

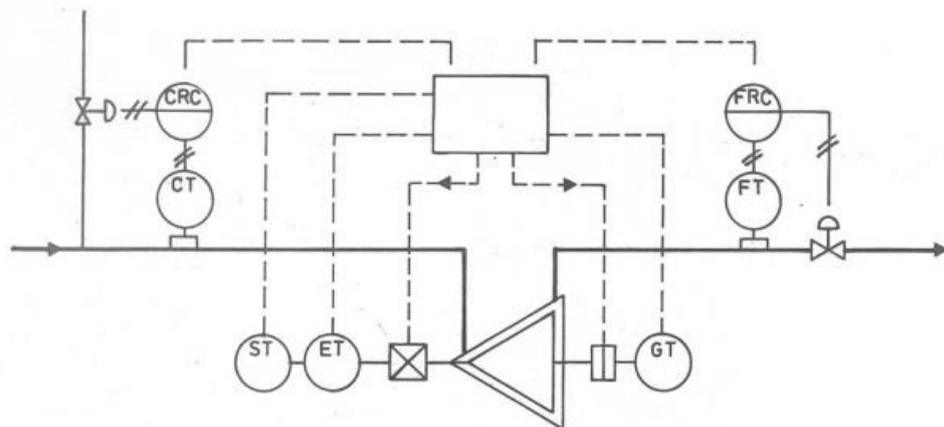


Figura I.3.30: Esquema de regulación de Es y Bs.

Los sistemas anteriores son de tipo “circuito abierto”, puesto que no se mide ninguna variable que esté verdaderamente ligada a la

evolución a la que se ve sometida la fibra durante el refinado. Un intento de paliar este defecto es el realizar un control sobre la suspensión fibrosa para intentar caracterizar el efecto del refinado, por ejemplo, la evaluación de la resistencia a la filtración de una muestra extraída automáticamente.

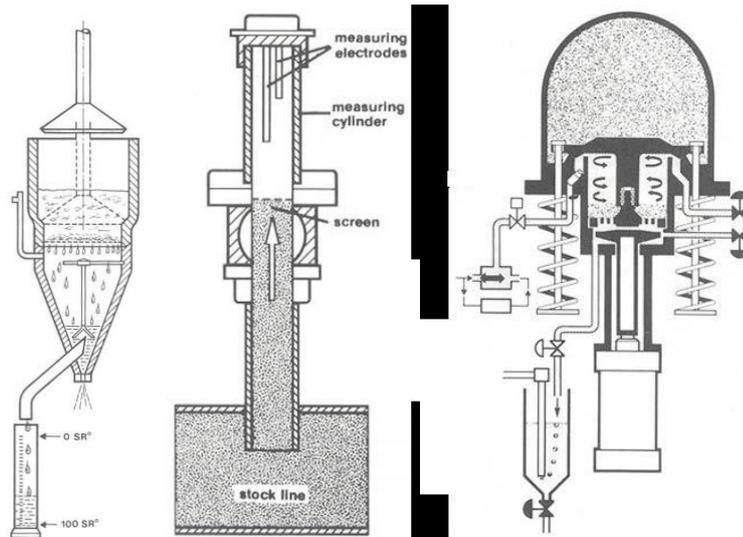


Figura I.3.31: Esquemas del Schopper-Riegler y de sistemas de medición de resistencia a la filtración.

En la figura I.3.31 se muestran los esquemas de dos sistemas de medición de la resistencia a la filtración. Básicamente, en el primero (esquema central) se mide el tiempo necesario para el desgote de una cierta cantidad de pasta (distancia entre electrodos) cuando ya se ha formado una torta sobre el tamiz (equivalente al desgote entre el tamiz y el primer electrodo); en el segundo (el de la derecha del todo) se hace una torta con una muestra tomada de la tubería y se mide la resistencia a la filtración de la misma, una alternativa en este aparato es volver a realizar otra medición sobre la misma muestra pero después de haber sido eliminada la fracción de finos mediante un lavado. La medida difiere conceptualmente de la del °SR, en el que se evalúa el drenaje, en condiciones de laboratorio, de 1 litro de una suspensión que contiene 2 g.



3.7.7. Energía en el refinado

La operación de refinado es una de las que más energía requiere en la fabricación de papel. Los valores requeridos variarán en función de muchos parámetros, tal como se indicó anteriormente, y para cada aplicación deberá hacerse un estudio detallado, aun así, se pueden dar aproximaciones a partir de fórmulas empíricas como:

$$P = p * K * \Delta$$

Donde:

- P: potencia de refinado (kW).
- p: producción (caudal másico) (t/h).
- K: energía específica (kWh/t.°SR).
- Δ: incremento de °SR

Los valores de la energía específica se pueden obtener de la tabla I.3.10:

Tabla I.3.10: Energía específica para diferentes tipos de pastas y refinadores

Pasta	Cónicos	Discos	°SR final
Resinosas:			
Bisulfito crudo	14 - 12	12 - 8	30 - 60
Bisulfito blanqueado	12 - 10	10 - 6,6	30 - 60
Kraft crudo	25 - 20	16 - 8	30 - 60
Kraft alto rendimiento		10,5	
Sulfato blanqueado	22 - 17	12 - 8	30 - 60
Fronzosas:			
Crudas		8	
Blanqueadas	10 - 8	8 - 6,6	30 - 40

La experiencia recomienda no sobrepasar unos ciertos valores de energía por tonelada y pasada. Dependiendo de la resistencia al refinado de las fibras y el resultado de refinado que se desea la energía transferida se dosificará en cada pasada, de manera que si se necesita más energía debe haber varios refinadores en serie.

Tabla I.3.11: Energía por tonelada y pasada

Tipo de pasta	kWh/t
Kraft cruda resinosa	40 - 240
Sulfato resinosa	40 - 200
Sulfato frondosas	40 - 80
Alto rendimiento y papelote	20 - 100
Eucalipto	20 - 175

Los valores inferiores del intervalo son los valores mínimos en una pasada, un valor menor no dará efecto de refinado.

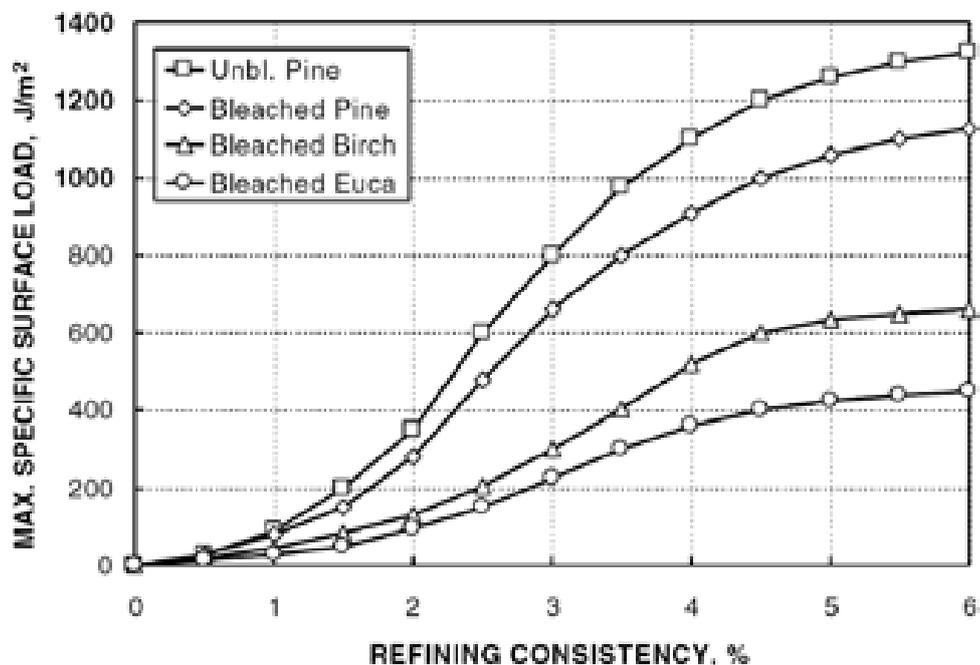


Figura I.3.32.: Intensidad de refinado vs. consistencia.

La figura I.3.32 indica la intensidad máxima de refinado para varias pastas a distintas consistencias. El autor indica consistencias entre 3,0-5,0%, en el refinado de resinosas, 4,0-5,0% en el de frondosas y del 3,0-3,5% en el refinado del recorte. Menos del 3,0% de consistencia al refinar las fibras largas de resinosas aumenta considerablemente la tendencia de corte. En el caso de las fibras cortas de frondosas la disminución de la consistencia aumenta la rotura de los flóculos con desprendimiento de más fibras de los bordes de las barras hacia las ranuras, evitando así la acción de refinado.

Durante el refinado se reduce la resistencia de las fibras, por lo que se debe reducir la intensidad de refinado para refinados prolongados. En la siguiente figura se indican la intensidad de refinado vs. Schopper-Riegler ($^{\circ}$ SR) para distintas pastas:

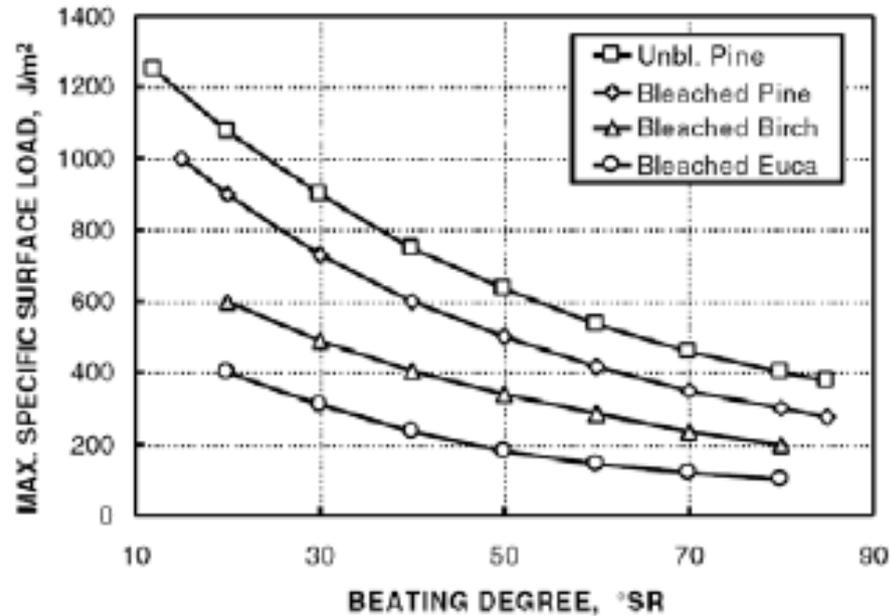


Figura 1.3.33: Intensidad de refinado vs. $^{\circ}$ SR.

3.7.8. Efecto de las condiciones de refinado

A continuación, veremos los resultados de una serie de ensayos realizados con un refinador industrial Conflo JC-01 (consistencia 4,0%, barras de 4,5 mm de ancho, 1 000 rpm, intensidad de refinado de 3,9 J/m²-830 J/m²) y pasta al sulfato de pino ECF. La entrada neta de energía en la primera serie fue de 75 kWh/t en cada paso y, en la segunda serie se aumentó a 150 kWh/t (reducción de caudal de 950 l/min a 475 l/min).

En ellos se pone de manifiesto la influencia de la transferencia de energía en el refinado y el distinto comportamiento de diferentes pastas.

3.7.8.1. Utilización de pasta Kraft como refuerzo

Cuando se utiliza pasta kraft como refuerzo es importante desarrollar resistencia a la tracción tratando de mantener la longitud de la fibra y el desgarro lo más alto posible. Del estudio se desprende que para la misma energía total 75 kWh/t en una sola pasada produce mejores propiedades de refuerzo que 150 kWh/t en una pasada.

La entrada de más energía en una sola pasada muestra un aumento más rápido del Schopper-Riegler que la entrada de energía más baja:

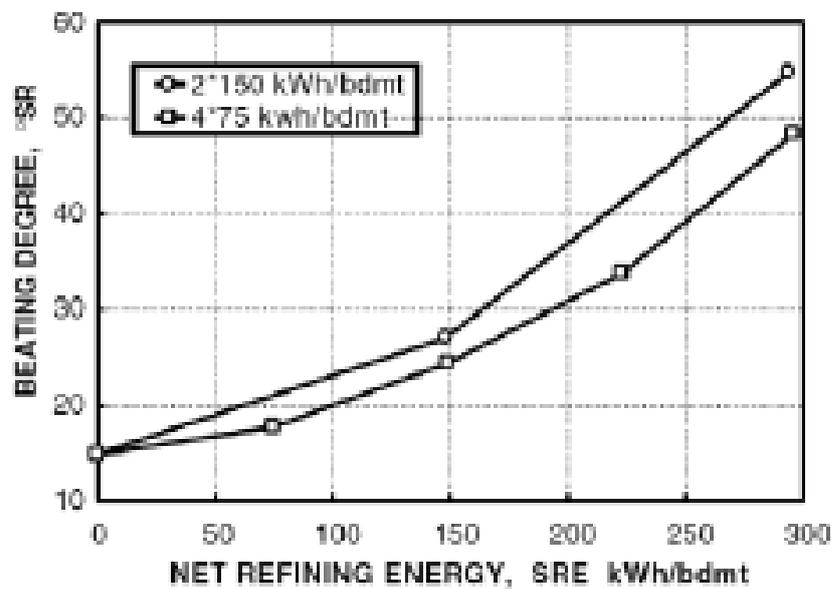


Figura I.3.34: °SR vs. Energía de refinado.

La obtención de una resistencia a la tracción determinada requiere menos energía (tanto neta como total) si se aplica en varias pasadas (intensidad de refinado menor):

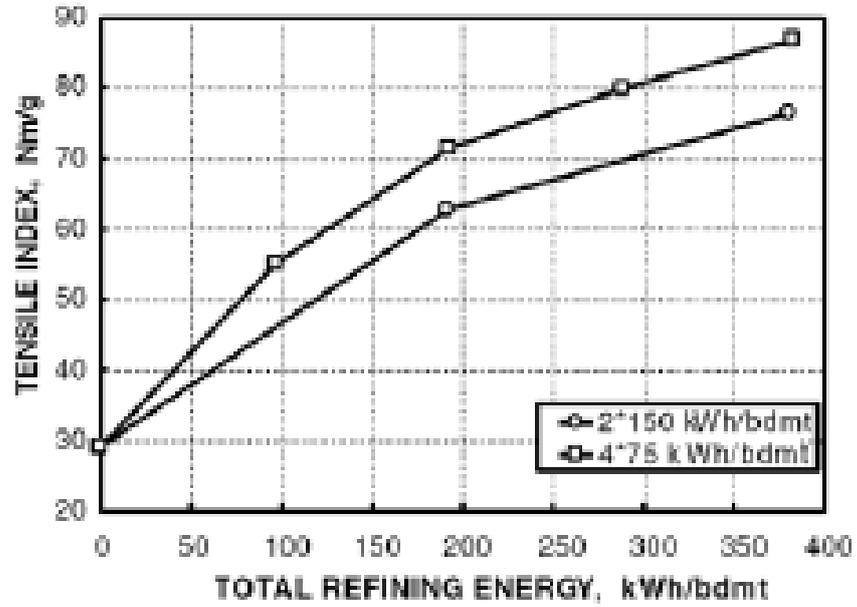


Figura I.3.35: Índice de tracción vs. Energía de refinado.

La aplicación de energía más baja en varias etapas también produce una mayor resistencia a la tracción, para un °SR dado, que si se aplica el mismo valor de energía en menos pasos.

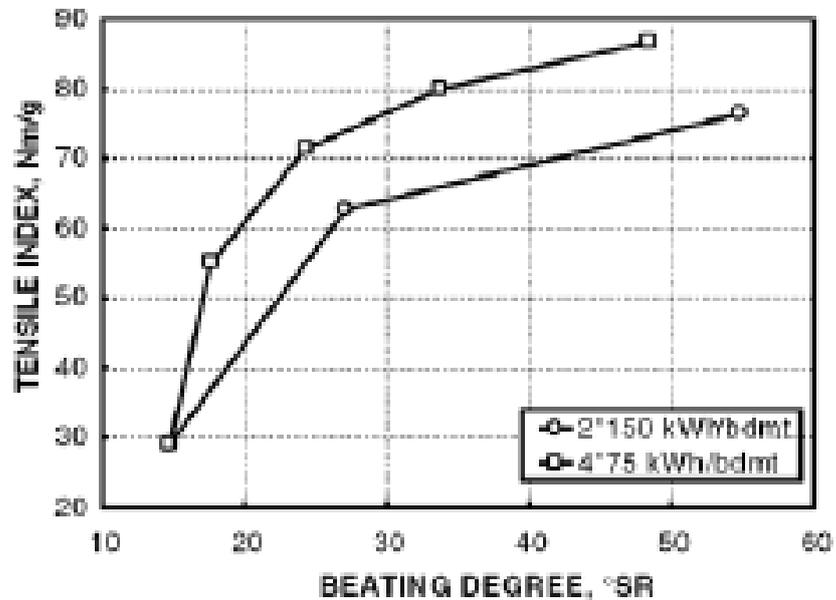


Figura I.3.36: Índice de tracción vs. °SR.

Una menor entrada de energía en cada etapa favorece la combinación de desgarro y resistencia a la tracción y cuanto mayor es la energía de entrada en cada etapa mayor es el acortamiento de la fibra.

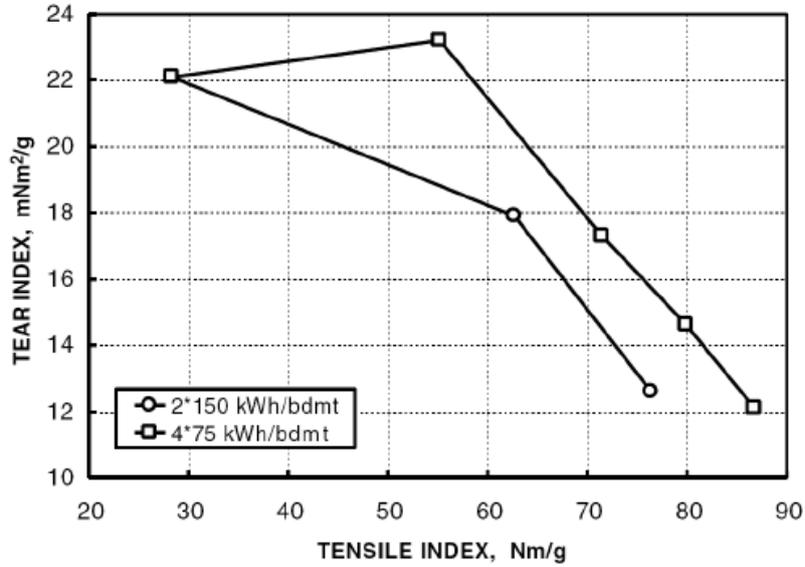


Figura 1.3.37: Índice de desgarro vs. Índice de tracción

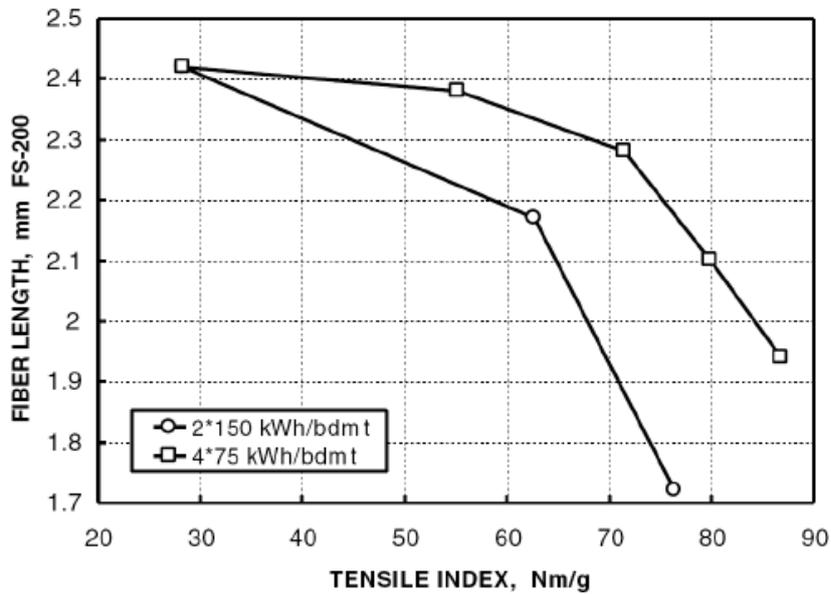


Figura 1.3.38: Longitud de fibra (ponderada en peso) vs. Índice de tracción.

3.7.8.2. Comparación de pastas diferentes

Aquí veremos ensayos realizados con un refinador industrial Conflo JC-01, para el pino barras (LM) de 4,5 mm de ancho e intensidad de refinado de 3,5 J/m² -740 J/m²- y para el abedul y eucalipto barras (SM) de 2,5 mm e intensidad de refinado de 0,8 J/m² -315 J/m²-. Las siguientes figuras muestran la evolución del °SR, WRV y longitud de fibra en función de la entrada neta de energía:

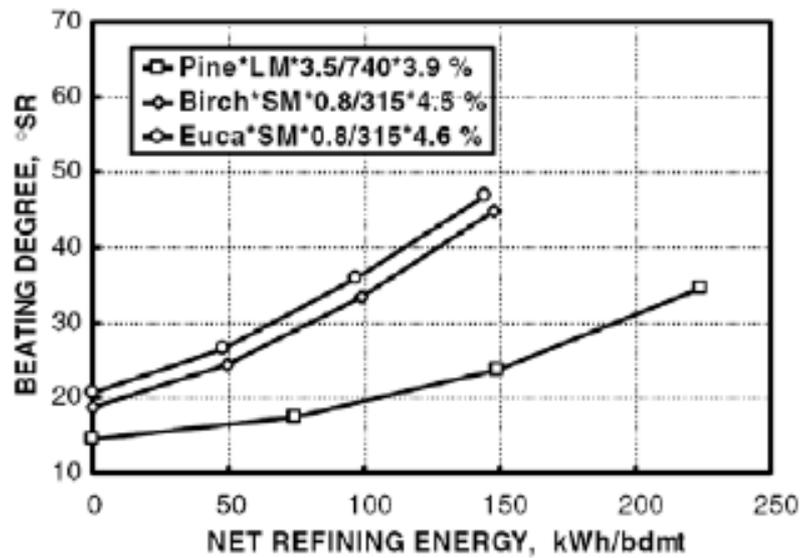


Figura 1.3.39: °SR vs. Energía de refinado.

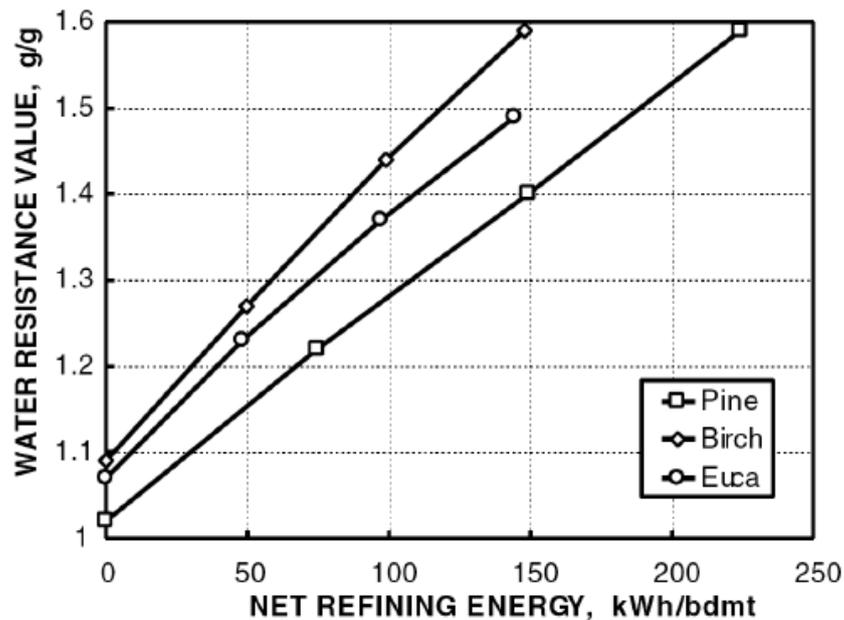


Figura 1.3.40: WRV vs. Energía de refinado.

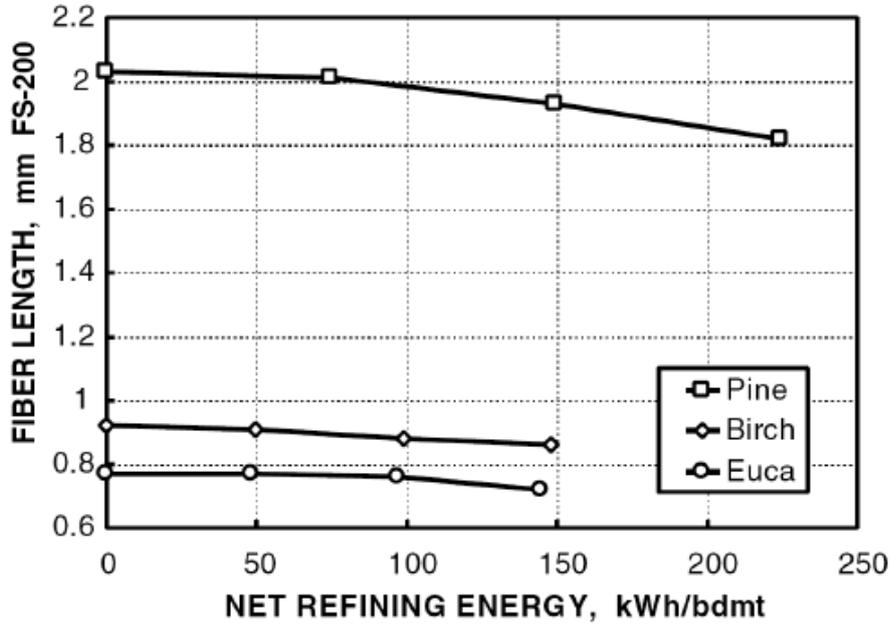


Figura I.3.41: Longitud de fibra (ponderada en peso) vs. Energía de refinado.

Para una determinada resistencia a la tracción las pastas de frondosas deben refinarse a mayores °SR que las pastas de coníferas, pero obtener estos valores requieren dispensar una menor cantidad de energía.

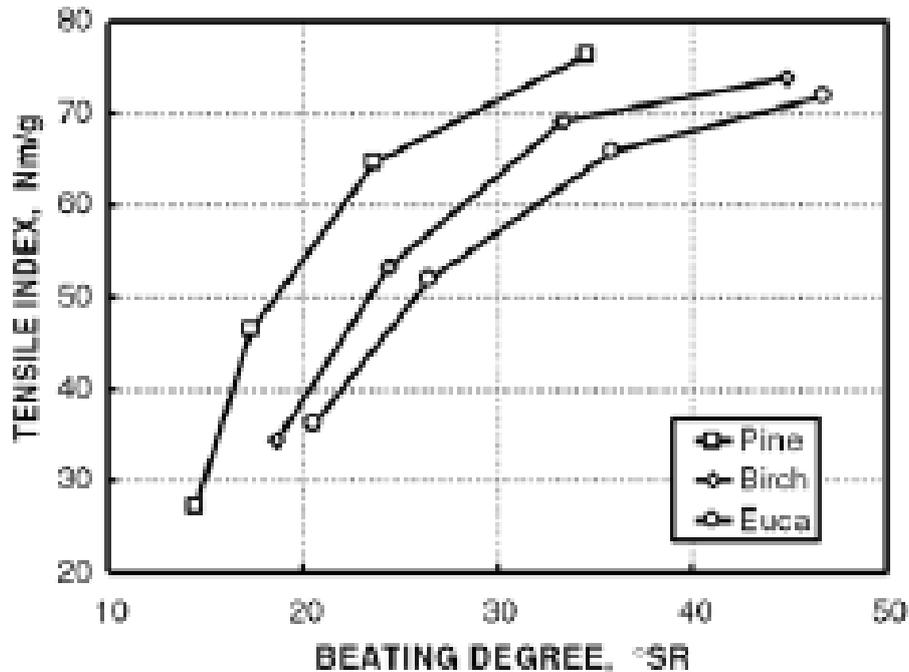


Figura I.3.42: Índice de tracción vs. °SR.

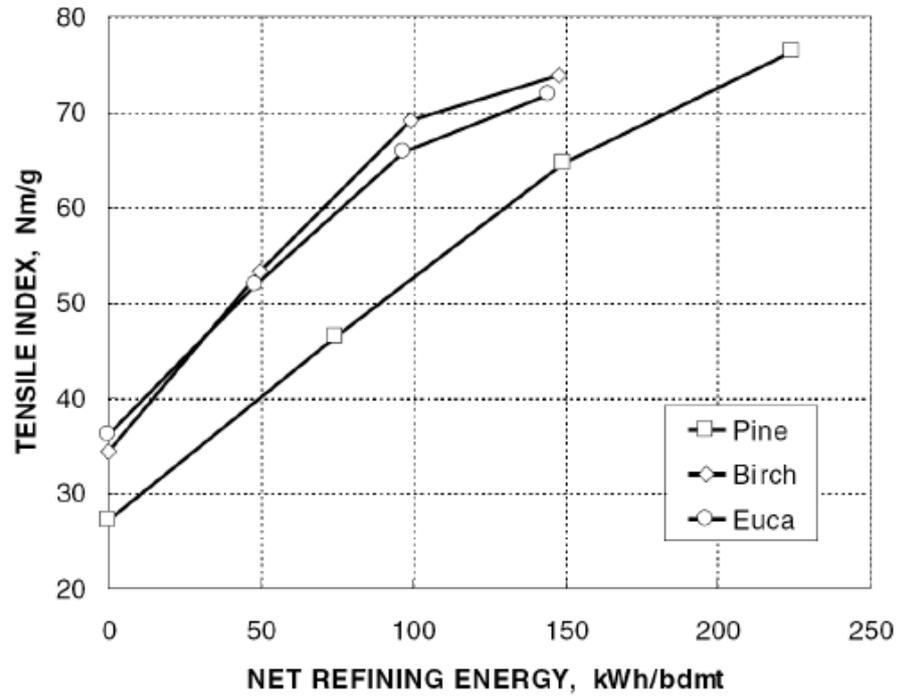


Figura I.3.43: Índice de tracción vs. Energía de refinado

En la figura I.3.44 se observa la influencia de la longitud de fibra en el índice de desgarro.

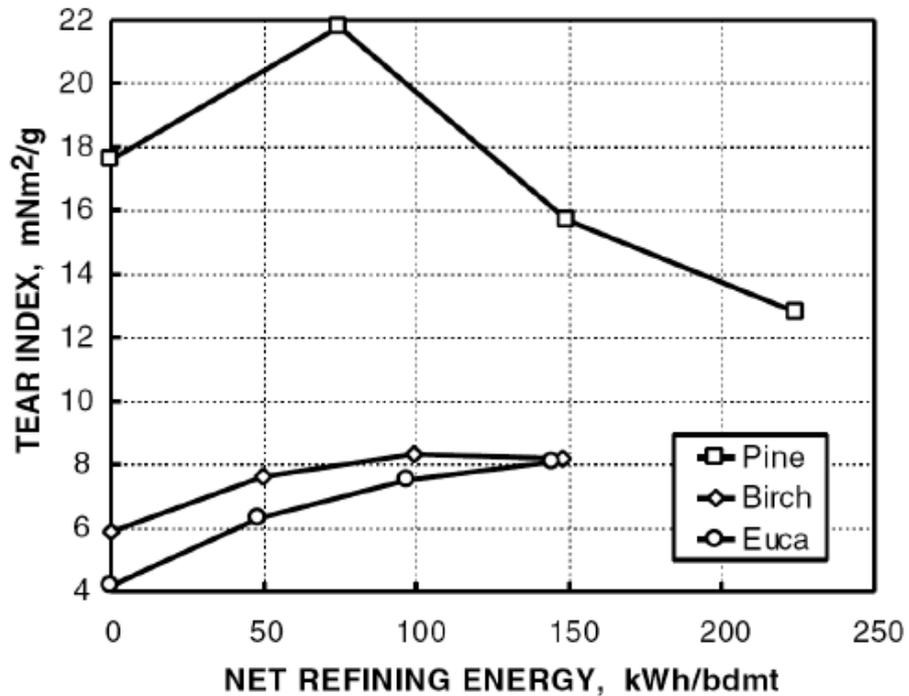


Figura I.3.44: Índice de desgarro vs. Energía de refinado.

Por último, se observa el desarrollo "lineal" del índice de estallido en función de la entrada neta de energía.

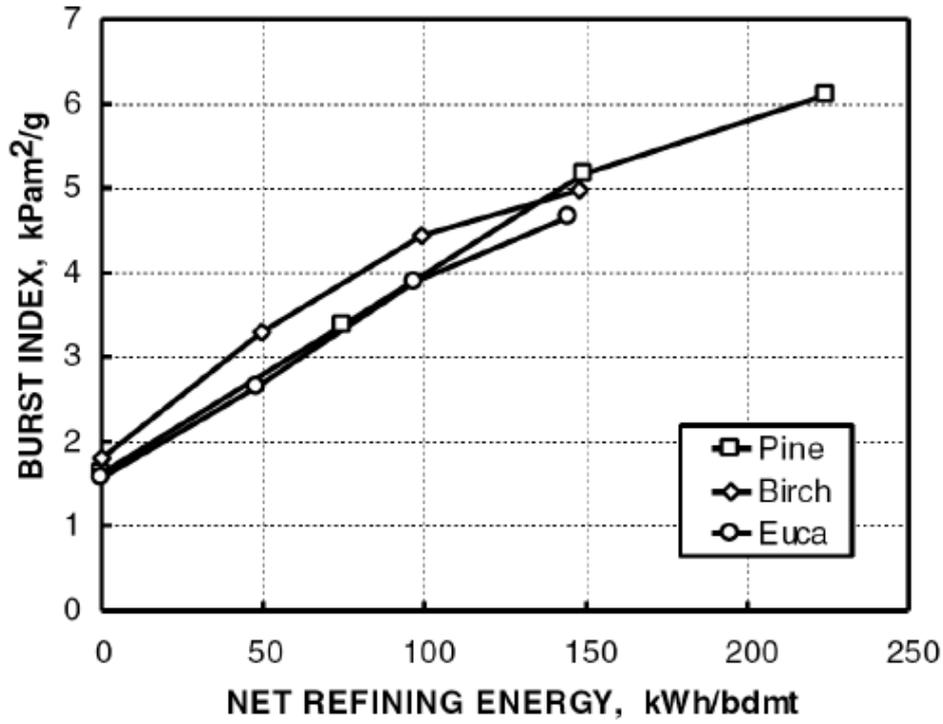


Figura I.3.45: Índice de estallido vs. Energía de refinado

3.7.9. Propiedades afectadas por el refinado

Como resumen final del refinado, vemos las propiedades modificadas en esta etapa:

- Propiedades que aumentan:
 - Densidad aparente (g/cm^3)
 - Índice de tracción (longitud de rotura) (Nm/g)
 - Transparencia
 - Alargamiento (%)
 - Cohesión interna (Scott)
- Propiedades que disminuyen:
 - Porosidad
 - Opacidad
 - Desgote de la pasta
 - Índice de volumen



3.8. Mezcla de aditivos

Es imprescindible que el papel final tenga una serie de características y propiedades adecuadas en función de su diferente uso, por ello, dependiendo del tipo de papel que se desee obtener, se deben añadir a las fibras una serie de productos no fibrosos que modifican sus propiedades y las del papel obtenido de ellas, estos productos se pueden clasificar en dos grupos: aditivos y auxiliares.

Los productos no fibrosos (aditivos o auxiliares) se pueden aplicar de dos formas:

- En "masa": cuando se hace durante el proceso de preparación de la pasta.
- En "superficie": cuando la hoja ya está formada. Para este método se suele utilizar una máquina denominada Speed Sizer.

3.8.1. Aditivos

Son productos que se añaden en el proceso de fabricación para modificar las características del papel. Los más empleados son:

- **Cargas y pigmentos:** Son aditivos de carácter inorgánico (de origen mineral). Siendo su composición química básicamente igual, la diferencia esencial entre ambos es que los pigmentos tienen un tamaño de partícula más pequeño, y mientras que las cargas se aplican en masa, los pigmentos se aplican en superficie.
 - Las **cargas** son partículas minerales, de color blanco, que se utilizan como relleno en los espacios entre fibras, con el fin de mejorar algunas propiedades del papel, como la opacidad y la blancura, y además aumentar la calidad de la impresión al mejorar la superficie. No obstante, su utilización también tiene desventajas, ya que produce una disminución de las resistencias mecánicas del papel, al disminuir las uniones entre fibras, lo que hace que haya un límite en las formulaciones. Entre las cargas más utilizadas están el caolín, el carbonato de calcio, el talco y el sulfato de calcio.
 - Los pigmentos contribuyen a mejorar determinadas propiedades del papel (especialmente la blancura, opacidad y aptitud a la impresión). Los pigmentos se utilizan especialmente en "superficie", mediante una operación llamada estucado. Los pigmentos más utilizados son el caolín, el carbonato de calcio y el dióxido de titanio.



- **Colorantes:** Se utilizan básicamente para conseguir un papel con un color determinado y, a su vez, darle un matiz más agradable.
- **Agentes de blanqueo óptico (A.B.O.):** Son unos compuestos que tienen la particularidad de proporcionar a los papeles que los contienen la propiedad de emitir una luminosidad azulada cuando están en presencia de una luz ultravioleta, siendo ópticamente más blancos.
- **Resinas para dar resistencia en húmedo:** Son productos que se añaden para ayudar a conservar la resistencia del papel cuando su uso comporte una necesidad de resistir la acción del agua. Estas resinas desarrollan esta propiedad gracias a la formación de enlaces químicos entre resina y fibra que impiden las uniones entre fibra y agua (el agua no puede unirse a la fibra ya que ésta está "recubierta" por la resina).
- **Ligantes:** Son productos (como una especie de "pegamento") que se añaden en la operación de estucado para que los pigmentos queden unidos entre sí y, a su vez, queden fijados a la superficie del papel (al ser la fibra un componente de naturaleza orgánica, de forma fibrosa, y los pigmentos de naturaleza inorgánica, en forma de partículas, su unión no puede realizarse sin la presencia de un ligante).
- **Productos de encolado:** Son aquellos que se utilizan para ofrecer resistencia a la penetración de los líquidos en el papel, es decir, tienen por objeto conseguir un papel más impermeable al agua.
- **Productos para dar resistencia en seco:** Son productos que se utilizan para mejorar la fuerza de uniones fibra-fibra individualmente gracias a la creación de puentes de hidrógeno suplementarios entre las fibras, sin necesidad de refinar excesivamente (el refinado incrementa la resistencia en seco, pero empeora el drenaje en la tela de fabricación aumentando el consumo energético para el secado).

3.8.2. Auxiliares

Son aquellos que no modifican de manera importante las propiedades del papel, siendo su misión principal la de facilitar el trabajo y ayudar en el proceso de fabricación. Los más utilizados son:

- **Antiespumantes:** Su función es la de eliminar o impedir la formación de la espuma que se suele producir en diferentes puntos de la máquina de papel, ya que dicha espuma disminuye la calidad del papel y ocasiona roturas y defectos.
La espuma evita la oxigenación del agua, y en circuitos cerrados sin aporte de agua fresca puede ser un problema por el crecimiento de



bacterias anaerobias facultativas. Además, la espuma es una emulsión que puede aglutinar carbonato formando depósitos en las superficies de los canales de conducción.

Un antiespumante debe ir acompañado de unas instalaciones bien diseñadas sin saltos de agua ni turbulencias y con unos rociadores "mataespumas" eficaces.

- **Microbicidas:** Estos productos se utilizan para evitar la posible formación de colonias de bacterias u otros microorganismos que se adhieren a las paredes de tinas o circuitos, fieltros y demás elementos de la máquina. Debido a la humedad, estos microorganismos encuentran una zona perfectamente acondicionada para su proliferación y pueden provocar ensuciamiento del papel, roturas en la banda, infecciones, etc.
- **Retentivos:** Los retentivos se añaden en la fabricación del papel para mejorar la fijación de diferentes aditivos, finos (trozos de fibra) y cargas, evitando que éstos se vayan por las aguas blancas del desgote en la mesa de fabricación, lo que ocasionaría pérdida económica y problemas en los circuitos. Mediante los agentes de retención se consigue incorporar poco a poco al papel componentes que, de no hacerlo, pueden generar problemas de depósitos, o pitch, al dejar acumularse en el circuito de aguas coladas y que podrían provocar agujeros o roturas.

3.9. Depuración

La depuración es un proceso en el que se pretende eliminar aquellas partículas que no son deseables durante el proceso de fabricación o en el papel acabado. Puede realizarse en diferentes momentos del proceso de fabricación del papel: a la salida del púlper, en cabeza de máquina, etc. Dependiendo del tipo de papel se realizará una mayor o menor depuración.

Los objetivos principales de la depuración son:

- Obtener un papel limpio, sin manchas.
- Evitar roturas y desgastes en la fabricación.

3.9.1. Origen y clasificación de las impurezas

Las impurezas se pueden clasificar como:

- Impurezas de peso (pesadas y pequeñas): arenas, grapas etc.

- Impurezas de tamaño (voluminosas y ligeras): astillas, pegotes etc
El origen de estas impurezas puede ser diferente:
- Propias de la pasta: astillas, resinas, cenizas, etc.
- Debidas al transporte y almacenaje: arena, alambres, cuerdas, metales, etc.
- Debido a la fabricación: limaduras, pastillas, pegotes, aceite, etc.

3.9.2. Depuradores

El aparato donde se realiza la depuración se llama depurador. Se diferencian dos sistemas de depuración según el modo de trabajar:

- **Depuradores probabilísticos o de ranuras y perforaciones:** Este tipo de depuradores elimina las partículas de tamaño relativamente grande. Se basa en las probabilidades de que una partícula atraviese una malla o tamiz perforado. Para pastas se suelen utilizar tamices o mallas con ranuras, y en la fabricación de papel, tamices con perforaciones (agujeros). El depurador consta de un tamiz con ranuras o agujeros, según sea el caso, que evita que pasen a través de él las partículas voluminosas, separándolas así de las fibras, que son más pequeñas y sí pasan por las ranuras o agujeros. Se pueden encontrar dos tipos de depuradores probabilísticos: planos vibrantes y cerrados a presión.

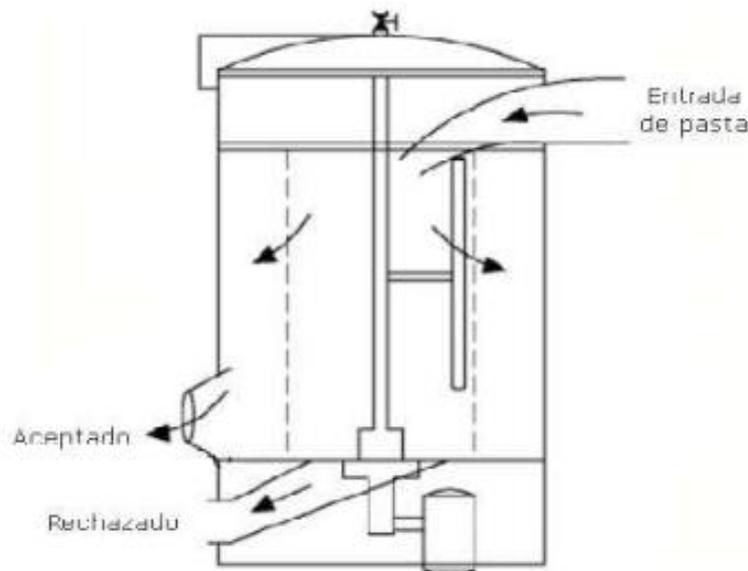


Figura I.3.46: Depurador probabilístico

- **Depuradores dinámicos o ciclónicos:** Este tipo de depuradores eliminan las partículas más pesadas. El depurador ciclónico, conocido con el nombre de "cleaner", consiste en un cono de material plástico o bien cerámico (más duraderos pero más caros) según la fase de tratamiento y el tipo de cargas que se adicionan en máquina. Tiene una salida superior para la pasta aceptada y una boquilla inferior para las partículas de rechazo. La pasta es alimentada a una presión de entrada creando una especie de torbellino y, por efecto de la fuerza centrífuga de rotación de la pasta, las partículas más pesadas (impurezas) van hacia la pared, resbalando hacia la boquilla inferior y produciéndose lo que se llama "rechazo". Las partículas más ligeras quedan en capas centrales, para salir finalmente por la parte superior a una presión diferente a la de entrada.



Figura I.3.47: Depurador ciclónico

Ambos sistemas de depuración son complementarios y necesarios durante la fabricación del papel. Ello es debido a las propiedades y finalidades de trabajo específicos que posee cada uno.

3.9.3. Depuración secundaria

La depuración secundaria consiste en volver a depurar el material de rechazo que viene de la depuración primaria, para asegurarse de que no se pierde mucha pasta durante esta primera fase. Este proceso se puede realizar hasta tres y cuatro veces, para conseguir un mayor rendimiento y una mejor eficacia. Cuando el rechazo llega a tener una cantidad despreciable de fibras se puede verter directamente al desagüe.

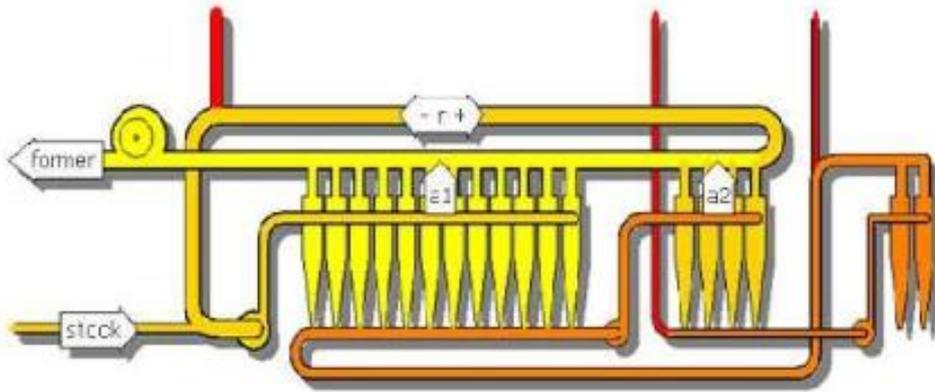


Figura I.3.47: Depuración en cascada (tres fases).

La pasta aceptada en la depuración secundaria nunca se da por definitiva, sino que se vuelve a depurar. A continuación, se puede ver un esquema donde se observa el recorrido que hace la pasta durante la depuración antes de pasar a la máquina de fabricación.

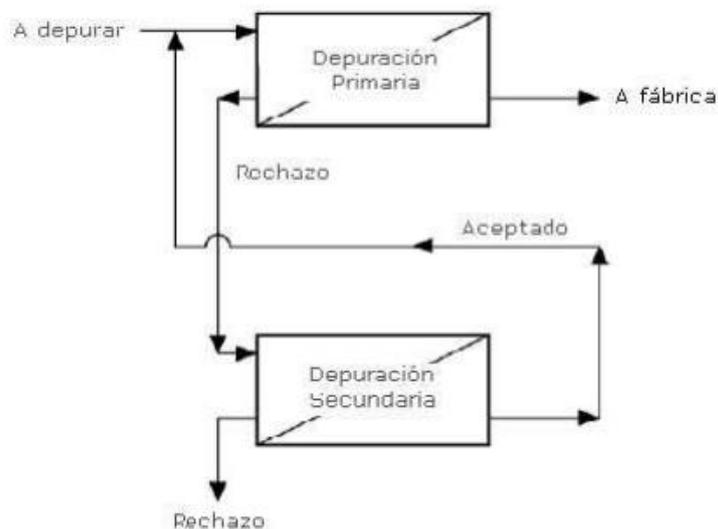


Figura I.3.48: Depuración secundaria

3.10. Máquina de papel / Formación de la hoja

Una vez que se han dado las propiedades necesarias a la pasta de papel y se ha preparado convenientemente la mezcla de materias primas (fibras, aditivos, pigmentos, etc.) en la tina de mezclas, las siguientes fases del proceso de fabricación de papel van a ser básicamente iguales para cualquier tipo de papel. A partir de aquí se realizará la formación de la hoja, es decir, se transformará un caudal de esa pasta diluida en una lámina delgada, ancha y uniforme, con todos los componentes perfectamente distribuidos. Esta lámina constituye lo que más tarde será la hoja de papel. En la industria papelera, se entiende por formación de la hoja a la disposición mediante la cual las fibras se entrelazan unas con otras (esto se puede observar mirando la hoja a transparencia). Esta formación de la hoja se realiza en dos partes bien diferenciadas de la máquina:

- **Caja de entrada:** es una caja con forma alargada de sección triangular cuya misión es la de distribuir la pasta a todo lo ancho de la mesa de fabricación o mesa formadora. Se controla la dilución de la pasta (entre 0,3 y 0,8%), el nivel de la caja, la presión en su interior y la apertura del labio de salida. Este elemento tiene mucha importancia, debido a que hace que se orienten las fibras en un sentido o en el otro, según convenga. También es fundamental el perfecto control del reparto de la pasta realizado en este punto, ya que de él dependerán algunas características tan importantes como el gramaje final del papel y la homogeneidad del perfil transversal de la hoja.

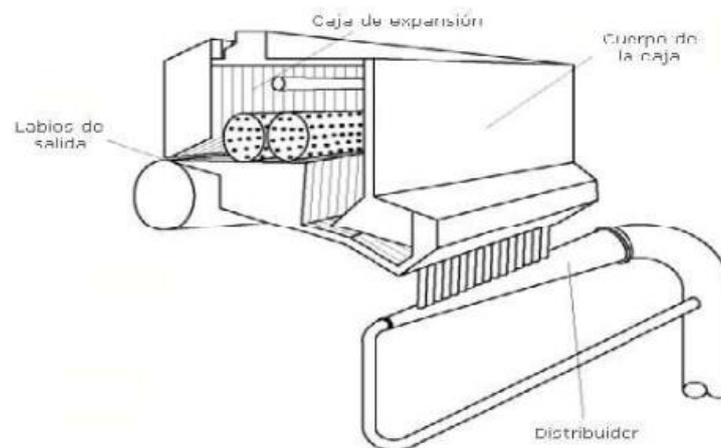


Figura I.3.49: Caja de entrada



- **Mesa de fabricación:** es la encargada de formar la hoja y reducir parte del agua que contiene la pasta. Se encuentra situada a continuación de la caja de entrada, y tiene la misión de deshidratar la pasta (eliminando una gran cantidad del agua que contiene) y de formar la hoja de papel.

Una mesa de fabricación está formada por una serie de elementos que permiten, cada uno a su manera, realizar el proceso de formación de la hoja convenientemente. La pasta, enviada a través del labio de la caja de entrada, se deposita sobre una "tela" sin fin, la cual se encarga de transportar las fibras a lo largo de la mesa de fabricación. Durante ese recorrido se va consolidando la hoja pasando sobre los diferentes elementos, realizando el efecto de desgote (eliminación del agua). Al perder el agua, las fibras quedan depositadas sobre la superficie de la tela, constituyendo lo que será la hoja de papel. El desgote en la mesa de fabricación se realiza en dos etapas:

- 1ª etapa: desgote por gravedad. En los primeros metros de la mesa, el agua se elimina pasando libremente a través de la tela por efecto de su propio peso (fuerza de gravedad) y por la pequeña depresión que crean algunos elementos de la mesa (foils, rodillos desgotadores etc). Las fibras quedan retenidas en la parte superior de la tela.
- 2ª etapa: desgote por vacío. Cuando ya no es posible eliminar más agua por medio de la fuerza de la gravedad, se utilizan elementos de vacío que, mediante el efecto de una fuerza aspirante, eliminan el agua que hubiera quedado entre las fibras. Dichos elementos son los "vacuofols", las "cajas aspirantes" y los "cilindros aspirantes", colocando los más energéticos al final. Se puede lograr hasta un 20% de sequedad.

En la máquina de papel existe una zona crítica que va desde la entrada de la caja hasta los primeros metros de la mesa de fabricación. En esta zona crítica se puede decir que la hoja queda prácticamente constituida fijando su estructura y características principales:

- Distribución de las fibras, debe ser lo más uniforme posible.
- Orientación de las fibras en sentido longitudinal (sentido de marcha de la máquina) o en sentido transversal.
- Distribución homogénea de las cargas y finos.

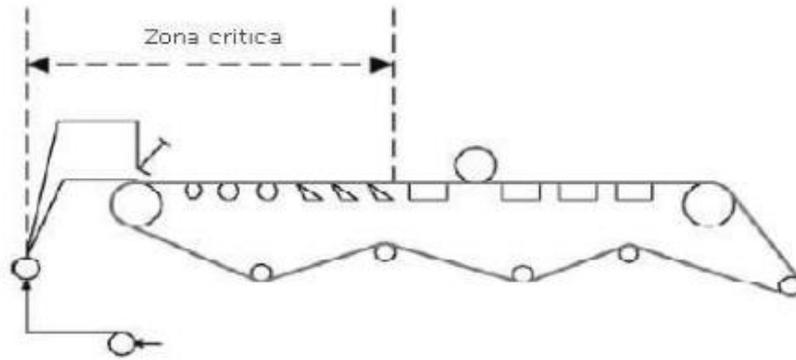


Figura I.3.50: Esquema de una mesa de fabricación donde se aprecia la zona crítica

3.10.1. Clasificación de las mesas de fabricación

Las mesas de fabricación de papel se pueden clasificar en:

- **Mesa plana convencional:** En este tipo de mesa, la cara inferior de la lámina de pasta, llamada cara tela, está apoyada sobre la tela, mientras que la cara superior, llamada cara fieltro, queda libre. El desgote del agua se produce en un solo sentido, es decir, hacia abajo. Debido a esto, las dos caras del papel tienden a tener una configuración diferente, soliendo ser más rugosa la cara tela que la cara fieltro.
- **Mesa de doble tela:** En este tipo de mesa, las dos caras de la hoja están en contacto con la tela. En este caso es posible dirigir el desgote del agua tanto hacia arriba como hacia abajo con ayuda de cajas aspirantes. De esta forma se obtiene una hoja más simétrica y con las dos caras más igualadas.

3.11. Prensado en húmedo

En la mesa de fabricación de papel, con ayuda de una serie de elementos desgotadores, es posible eliminar una parte del agua contenida la hoja. Posteriormente, a lo largo de su recorrido hasta su formación total, el papel necesita ir eliminando el resto del agua que contiene. El procedimiento de secado que se utiliza inmediatamente a continuación de la mesa de fabricación es el llamado prensado húmedo, y puede considerarse por tanto como una continuación del proceso de eliminación del agua que se había comenzado en la mesa de fabricación. La hoja de papel, al salir de la mesa de fabricación y entrar en la sección de prensas, tiene una consistencia aproximada de un 20%, es decir, contiene

aproximadamente un 80% de agua. Al final de la operación de prensado quedará, aproximadamente, con un 60% de agua. En este proceso, la hoja es transportada a través de unos rodillos que la presionan, los cuales consiguen extraer hasta un 20% más del agua y, a la vez, le dan al papel unas condiciones superficiales y de resistencia favorables para su posterior utilización.

En la sección de prensado, la hoja es transportada a través de una serie de prensas donde se elimina gran parte del agua y se consolida la hoja (las fibras son forzadas a un contacto íntimo) para facilitar posteriormente la operación de secado. El prensado húmedo se realiza haciendo pasar la hoja, en contacto con un fieltro, entre dos rodillos.

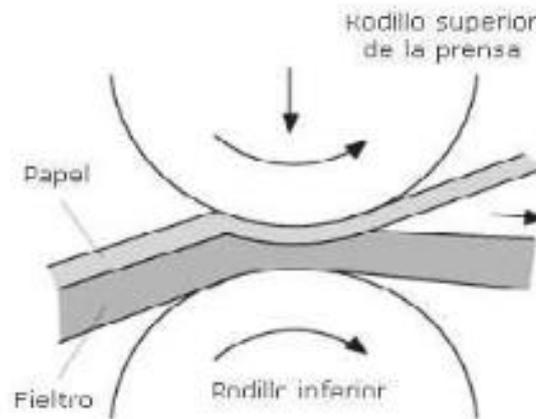


Figura I.3.51: Contacto de hoja y fieltro en el prensado húmedo

El fieltro es un tejido que gira alrededor de los rodillos de las prensas y que se encarga de transportar la hoja y absorber el agua gracias a su alto poder de absorción. A lo largo de su recorrido será lavado y secado para un nuevo contacto con el papel.

Los rodillos se encargan de aplicar la presión sobre el papel, el cual deja salir el agua que es absorbida por el fieltro para ser evacuada a continuación.

Las funciones principales de la operación de prensado son:

- Extracción de la mayor cantidad de agua posible, uniformemente a todo lo ancho de la máquina.
- Altos niveles de eficiencia y maquinabilidad, dando mayor resistencia mecánica a la hoja en la zona de prensas o parte húmeda.
- Ahorro energético en la operación posterior de secado.

- Maximizar la calidad de la hoja suministrando lisura superficial al papel sin reducir el espesor del papel en exceso y asegurando una igualdad de caras.

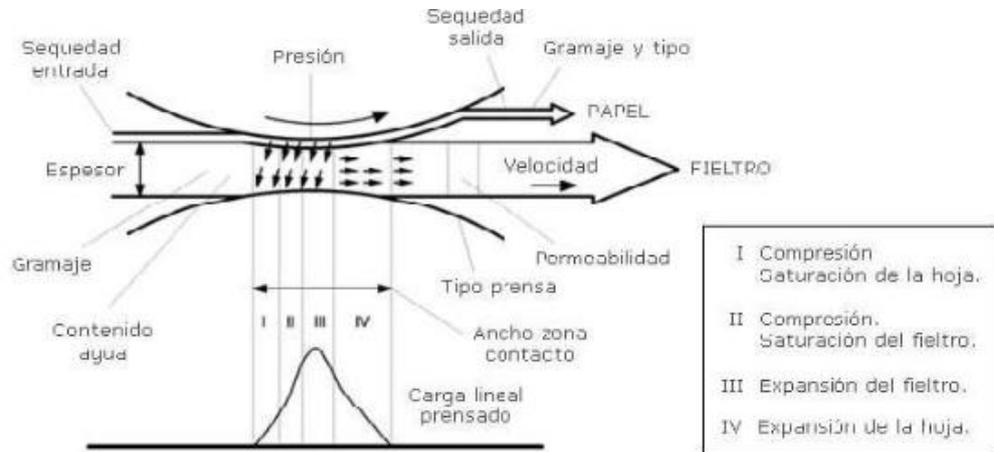


Figura I.3.52: Principales parámetros que inciden en el desgote de la hoja.

3.11.1. Fases del prensado

El proceso de prensado de papel se puede dividir en cuatro fases bien diferenciadas según el comportamiento de los elementos.

Compresión y saturación de la hoja (fase I). Comprende desde que la hoja entra en la zona de prensado hasta el punto en que ésta alcanza la **saturación**. En esta fase, debido a la compresión, el aire sale de los poros del papel, los cuales son ocupados por el agua. El agua va llenando la hoja hasta que ésta queda saturada, es decir, llega a contener la mayor cantidad de agua que es capaz de admitir. En esta fase la presión del agua no aumenta y el agua todavía no pasa de la hoja al fieltro.

Compresión y saturación del fieltro (fase II). Comprende desde la saturación con agua de la hoja hasta el punto de presión máxima del agua (hacia la mitad de la zona de prensado), que es donde el fieltro alcanza la saturación. Al llegar a esta fase la hoja ya está saturada, y el aumento de presión hidráulica provoca un movimiento del agua del papel hacia el fieltro, es decir, se produce el desgote del papel. El fieltro comienza a absorber agua hasta su saturación.

Expansión del fieltro (fase III). Comprende desde el punto en que la presión hidráulica (presión del agua) es máxima hasta el punto de



máxima sequedad de la hoja. En esta fase, la zona de prensado se expande hasta que la presión del fluido en el papel se anula. El fieltro se expande más rápido que la hoja por lo que éste succiona el agua. El desgote del papel continúa hasta el punto en que la hoja elimina la mayor cantidad de agua posible.

Expansión de la hoja (fase IV). Comprende desde el punto de máxima sequedad de la hoja hasta la separación de ésta del fieltro. En esta fase, el papel y el fieltro se descomprimen y el papel ya no se encuentra saturado. La presión hidráulica se convierte en "negativa", es decir, se produce un vacío de manera más acentuada en el papel, lo que produce un flujo de agua de retorno desde el fieltro hasta la hoja. Este último comportamiento del retorno del agua hacia el papel debe procurarse evitarse y para ello se debe cumplir:

- Una zona de contacto estrecha para reducir el tiempo de retorno del agua.
- Una separación rápida del papel y el fieltro.

3.11.2. Variables del prensado

Las principales variables que afectan a las prestaciones y funcionamiento de las prensas se resumen a continuación:

- Tipo de prensas y configuración.
- Velocidad de la máquina: a bajas velocidades hay que trabajar con bajas presiones, mientras que a altas velocidades se trabaja con altas presiones.
- Presión en la zona de prensado: a medida que las máquinas van siendo más rápidas las presiones van siendo mayores.
- Humedad de la hoja a la entrada de la prensa: un papel más seco puede soportar mayores presiones mientras que un papel muy húmedo reventaría.
- Humedad del fieltro: cuanto más seco está el fieltro, más tarda en saturarse y más agua es capaz de desgotar.
- Tipos de fieltro y conservación: acertar con el fieltro adecuado y mantenerlo en buenas condiciones favorece mucho la sequedad del papel.
- Propiedades del papel (composición, grado de refinado, compresibilidad, gramaje, temperatura, etc.).

3.11.3. Tipos de prensas

Lo más importante a la hora de diseñar una prensa es hacerlo de tal manera que se facilite el desgote de la hoja. Por eso, es muy importante proporcionar al agua que sale de la zona de prensado el camino más corto para su evacuación.

Teóricamente, la distancia más corta para el desgote coincide con el espesor del fieltro, por eso, el flujo principal de agua debería ser perpendicular al mismo y lo más vertical posible. De acuerdo con la forma de facilitar el desgote se puede hacer la siguiente clasificación de las prensas:

- Prensas lisas:

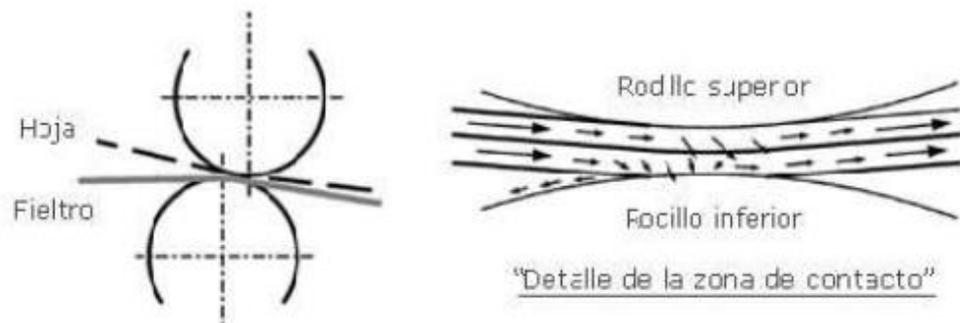


Figura I.3.53: Esquema de una prensa lisa

- Prensas aspirantes:

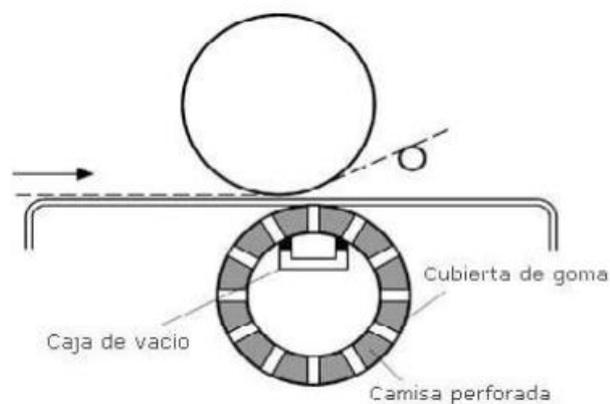


Figura I.3.54: Esquema de una prensa aspirante

- Prensas de zapata:

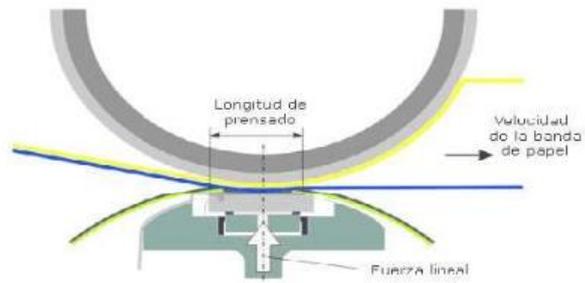


Figura I.3.55: Esquema de una prensa de zapata

- Prensas transversales:

- Prensa fabric:

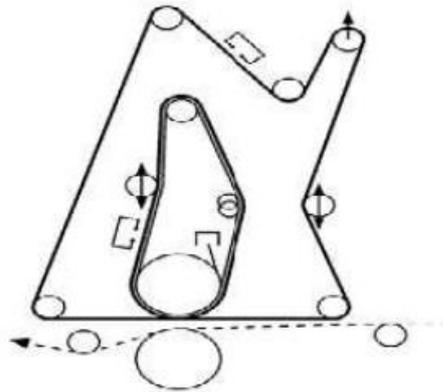


Figura I.3.56: Esquema de una prensa transversal fabric

- Prensa con rodillos ranurados

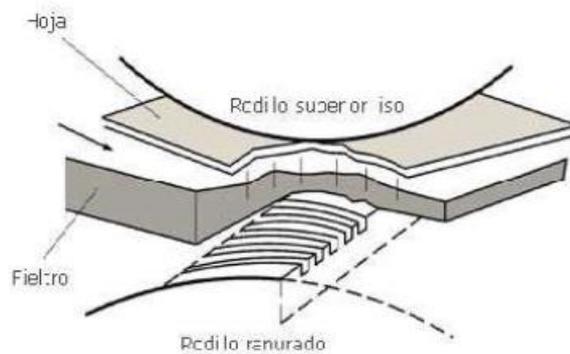


Figura I.3.57: Esquema de una prensa transversal con rodillos ranurados

- Prensa de rodillos de agujeros ciegos:

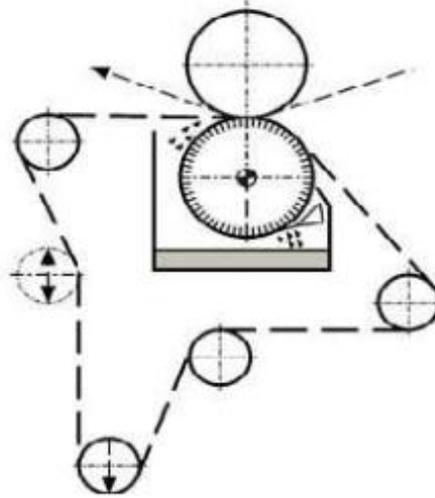


Figura I.3.58: Esquema de una prensa de agujeros ciegos

3.12. Secado

Cuando el papel sale de la sección de prensas, su contenido de agua suele ser de un 60%. A partir de aquí no es posible eliminar más agua por medios físicos, sino que la única manera de hacerlo será mediante la aplicación de calor. Esto se realiza con la operación de secado, con la cual se conseguirá reducir la humedad del papel hasta un 5% de agua, que es el contenido que debe tener al final del proceso de fabricación.

La operación de secado se realiza en una sección conocida como sequería, y en ella el calor hace que el agua de la hoja se evapore dejándola seca. Al final de esta operación, el papel habrá eliminado prácticamente la totalidad del agua que tenía, quedando con una ligera humedad (aproximadamente el 5%) deseada en su composición final para mantener su elasticidad.

La operación de secado es la más costosa dentro de la fabricación de papel. Por eso, es necesario tener una serie de cuidados durante el desarrollo de la misma para reducir al máximo sus costes.

El agua que se encuentra en el papel antes de ser eliminada es de tres tipos:

- Agua embebida:
 - Es aquella que está ocupando los huecos del papel.
 - Se encuentra en un 20-30%.
 - Es fácil de eliminar.



- Agua capilar:
 - Es aquella que proviene del refino.
 - Se encuentra ocupando las zonas amorfas de las fibras.
 - Oscila entre 6-8%.
 - Es más difícil de eliminar.
- Agua coloidal:
 - Es la que está formando parte de los compuestos químicos (hidratos de carbono).
 - Su contenido es de un 0-6%.
 - No se elimina en la sequería.

El secado del papel consiste en aplicar una gran cantidad de calor a la hoja, mediante el método apropiado, con el propósito de elevar su temperatura hasta conseguir la evaporación del agua. Se trata de un procedimiento químico, ya que provoca un cambio de estado de líquido a vapor.

En la operación de secado se produce:

- Una transferencia de energía (aplicamos calor a la hoja).
- Una transferencia de masa (agua en forma de vapor que debemos eliminar rápidamente hacia la atmósfera).

Por otra parte, la efectividad en la evaporación del agua depende de:

- La temperatura.
- La calidad del aire ambiental.
- La circulación del aire en la sequería.
-

Con la operación de secado se pretende obtener:

- Una formación homogénea de la hoja.
- Un perfil homogéneo de secado.
- Una distribución regular de la temperatura a la hoja.
- Una ventilación eficaz y equilibrada.

3.12.1. Mecanismos de secado

La transmisión del calor empleado para calentar la hoja en la operación de secado se produce principalmente de dos maneras:

- Por **conducción**. Se realiza a través del cuerpo (de molécula a molécula).



- Por **convección**. Es la forma de propagarse el calor en los fluidos (líquidos y gases). Los fluidos, al calentarse tienen menos densidad que cuando están fríos, por lo que tienden a subir.

Basándose en los distintos métodos de transmisión del calor, existe una amplia variedad de equipos de secado en la fabricación de papel:

- **Secado por aire a través**. Mediante el paso de aire caliente a través de la estructura porosa del papel. Se utiliza en papel tissue, papel de toallas, papel para filtro etc.
- **Secado con cilindro Yankee**. Mediante contacto del papel sobre un cilindro de grandes dimensiones calentado con vapor. Se utiliza en papel carbón, papel glassine, papel para envolver el pan etc.
- **Secado por chorro de aire**. Mediante el choque de un chorro de aire caliente sobre la cara del papel. Se utiliza para secar los revestimientos en muchos tipos de papel.
- **Secado infrarrojo**. Se utiliza para el secado de los recubrimientos y para el presecado de la hoja. Es muy empleado en papeles estucados.
- **Secado con cilindros calentados (sequería multicilíndrica)**. Es el método general empleado en el secado de cualquier tipo de papel. Consiste en una serie de cilindros de diámetro variable y calentados con vapor. El papel queda en contacto con los cilindros superiores por una cara y, con los cilindros inferiores por la otra, permitiendo el secado por ambas caras. En este método de secado se utilizan fieltros (excepto en la fabricación de cartón) para mantener la hoja en contacto con los cilindros.

3.12.2. El papel del vapor en el secado

El vapor es un gran transportador de energía que presenta las siguientes **ventajas**:

- Para su producción se utiliza agua (hay gran cantidad, es económica y fácil de obtener).
- Es muy controlable (a cada temperatura le corresponde una energía específica y un volumen específico).
- Transporta grandes cantidades de energía por unidad de masa, y es de fácil distribución y control.

Tipos de vapor:

- **Vapor saturado**: formado en su totalidad por agua evaporada, no contiene gotas de agua.

- **Vapor húmedo:** vapor que contiene gotas de agua en suspensión. Este vapor aumenta la erosión en las tuberías y reduce la transferencia de calor.
- **Vapor recalentado:** vapor que se encuentra a temperaturas superiores a la del vapor saturado, asegurando así que no contiene gotas de agua.

En la figura I.3.59 vemos un diagrama termodinámico con los diferentes tipos de vapor, en el que en el eje de abscisas se representa el volumen específico y en el eje de ordenadas la temperatura.

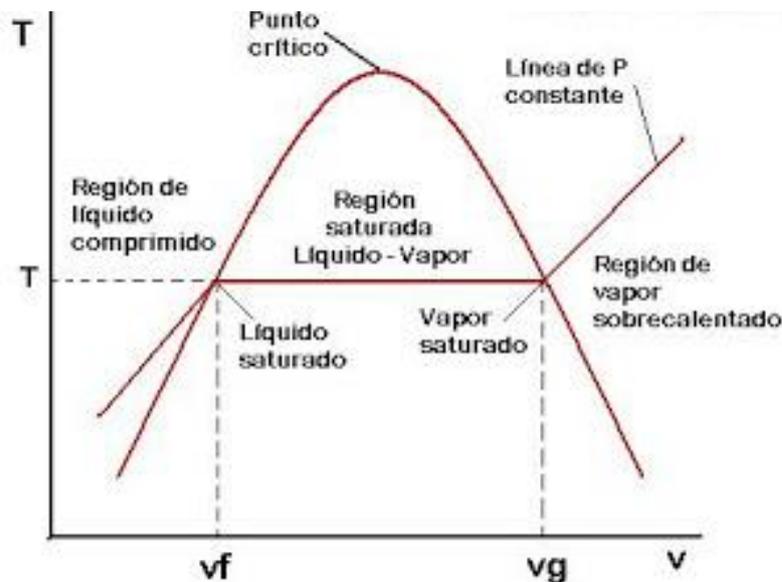


Figura I.3.59: Diagrama termodinámico

Es importante que el vapor no contenga impurezas (restos de sólidos procedentes de la misma agua, corrosión de las tuberías, restos de soldaduras, etc...). Para eliminar estas impurezas se instalan filtros en las tuberías. Tampoco puede transportar ni gotas de agua (producen corrosión en las tuberías) ni aire (efecto negativo en la transferencia de calor), y para eliminarlos se instalan purgadores. Como hemos visto, la evaporación del agua del papel se realiza por el calentamiento de éste al entrar en contacto con el metal caliente de los rodillos secadores. Estos rodillos, a su vez, son calentados introduciendo en ellos vapor. Este vapor proviene de una **caldera** y es conducido por una tubería hasta la entrada del cilindro, en cuyo interior se introduce mediante una "caja de vapor", que es la que une el secador con la tubería. Para evitar condensaciones en las tuberías durante la conducción del vapor hasta los cilindros secadores se utiliza el **vapor recalentado**.

El vapor recalentado, al entrar en los secadores y tomar contacto con las paredes de los cilindros cede calor a través de ellas, disminuyendo



su temperatura hasta alcanzar la de saturación. A esta temperatura el vapor se condensa (aparecen gotas de agua), con lo cual nos devuelve el calor (latente) que previamente se le había dado en la caldera.

3.12.2.1. Ventilación de la sequería

Durante el secado, el vapor que se forma al evaporarse el agua contenida en la hoja de papel se mezcla con el aire que rodea a la sequería. Al aumentar la temperatura del aire, éste eleva a su vez la capacidad de admitir vapor de agua (aumenta su temperatura de saturación), mejorando por tanto la velocidad de secado.

Sin embargo, este aire, a medida que absorbe el agua, tiende a saturarse, llegando a un punto en el cual no es capaz de recibir más cantidad de vapor procedente de la evaporación del agua del papel, con la consecuencia de que se retrasa el secado. Por esta razón, es necesario mantener el aire que rodea a la sequería caliente y seco. Esto se realiza extrayendo el aire saturado de vapor.

3.12.3. Condensados

El vapor cede calor al papel a través de los cilindros secadores y al perder calor, el vapor empieza a condensarse en gotas de agua que se depositan en el interior del cilindro. Estas gotas de agua es lo que se conoce como condensados. El comportamiento de los condensados, según la velocidad de la máquina, puede ser de tres tipos:

- **Régimen de balsa:** Se da cuando la velocidad de rotación del secador es lenta. Los condensados se acumulan en el fondo del secador por efecto de la gravedad
- **Régimen de cascada:** Al aumentar la velocidad, los condensados comienzan a subir adheridos a la pared del secador, aunque vuelven a caer por su propio peso, ya que la velocidad de rotación no es lo suficiente elevada.
- **Régimen de anillo:** A velocidades de rotación suficientemente altas, los condensados se adhieren a la pared debido a la fuerza centrífuga, formando una capa de espesor uniforme en forma de anillo por la pared interna del secador. Para estos casos se dispone de **barras de turbulencia**, que son una serie de barras montadas en el interior del cilindro secador que permiten romper el anillo de condensado, permitiendo una mejor evacuación de los condensados, y mejorar el perfil de transferencia de calor.

En la figura I.3.60 se muestran gráficamente estos tres regímenes.



Figura I.3.60: Distintos regímenes que se pueden dar en los condensados en función de la velocidad de la máquina

Los condensados pueden perjudicar el funcionamiento de los secadores produciendo:

- Un **aumento de peso en los rodillos**, entorpeciendo la marcha y demandando más consumo de energía.
- Una **reducción en la efectividad de transmisión del calor**, sobre todo en los cilindros inferiores, ya que el papel toma contacto con ellos en el punto donde los condensados tienden a quedar depositados (en los regímenes de balsa y cascada).

Por ello, es necesario extraer el agua condensada del interior de los secadores para evitar problemas durante el secado.

3.13. Estucado

El papel, cuando termina su formación, tiene una superficie que no es la más adecuada para la impresión de la tinta. Para mejorar su calidad superficial con objeto de poder aplicar tintas de impresión de una manera fácil y eficaz, se realiza la operación de estucado, que consiste en aplicar una especie de pintura que proporciona a la hoja la lisura y el brillo necesario para que la tinta se adapte bien al papel. El papel tiene una estructura porosa debido a las fibras. Por eso, cuando el papel entra en contacto con la tinta de impresión, ésta tiende a extenderse en todas direcciones. Para evitar esto, es necesario conseguir una superficie lisa y uniforme.

Con el fin de eliminar o tapar las cavidades del papel (macroporos) se le aplican una serie de aditivos que mejoran su superficie, haciéndola más lisa, con vistas a una buena impresión, disminuyendo las cavidades a un

tamaño muy pequeño (microporos) aunque suficiente para que la tinta pueda introducirse en el papel. A la vez, también se le proporciona propiedades como brillo, opacidad, lisura y blancura.

Esta operación es lo que se llama estucado, y se realiza exclusivamente en los papeles destinados a la impresión o escritura.

Con la operación de estucado se consiguen, principalmente, una serie de **ventajas** con respecto a un papel no estucado, como son:

- Mayor nitidez en las imágenes impresas.
- Papel más opaco.
- Consumo más reducido de tintas.
- Mejor limpieza en los contornos.

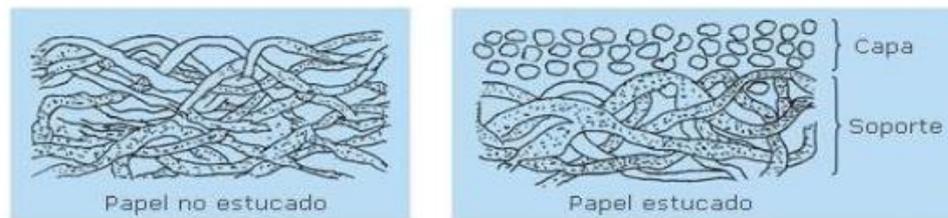


Figura I.3.61: Diferencia entre el papel estucado y el no estucado

En la figura I.3.61 se ven las diferencias entre el papel no estucado y el papel estucado. Este papel estucado adquiere una serie de propiedades:

- Alta resistencia al agua.
- Bajo poder absorbente, lo cual hace que se consuma menos tinta a la hora de imprimir.
- Superficies muy finas.
- pH alcalino, lo cual proporciona mayor facilidad para el secado de tintas.

El estucado consiste en aplicar una especie de pintura, denominada **salsa**, en la superficie del papel. En dicha operación intervienen tres elementos sin los cuales no sería posible realizar la operación que son:

- El soporte (papel).
- La salsa.
- La estucadora.

3.13.1. El soporte

Éste se presenta como un cuerpo poroso, compuesto de fibras y cargas, con más o menos espacios vacíos.

El soporte deberá ser:

- Homogéneo.
- Resistente.
- De espesor uniforme.
- Opaco.
- Limpio.
- Con las caras igualadas.
-

Para conseguir que el tratamiento sea efectivo, la superficie del papel tiene que tener una buena formación, sin defectos.

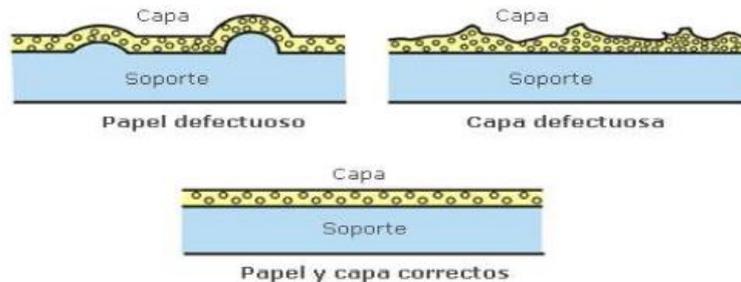


Figura I.3.62: Formación del estucado en el soporte

3.13.2. Salsa de estucado

Es el material o compuesto que se aplica sobre la superficie del papel, y que está formada por:

- Pigmentos.
- Ligantes.
- Aditivos auxiliares.

A la hora de aplicar dicha salsa, ésta se encuentra en estado líquido, más o menos viscoso, para poder extenderla con facilidad. Finalmente se seca mediante la evaporación del agua permaneciendo una capa de estuco sólida. La salsa de estucado se prepara en una sección que se denomina **cocina**.



3.13.3. Estucadora

Es el elemento donde se aplica la salsa de estucado, previamente fabricada en la cocina, sobre la superficie del papel. Se compone de:

- Una cubeta donde se deposita la salsa que se renueva continuamente.
- Un sistema de filtrado.
- Un dispositivo para aplicar y dosificar el baño (Backing-Roll).
- Un dispositivo para igualar la capa aplicada (cuchilla, rodillo, cuchilla de aire, etc.)
- Un sistema de secado.

Según el lugar en que se realiza la operación, se distinguen dos modos de estucado:

- **Estucado en máquina:** la estucadora se encuentra dentro de la máquina de fabricación de papel.
- **Estucado fuera de máquina:** la estucadora se encuentra fuera de la máquina de fabricación de papel.

3.13.4. Estucado en máquina

El método de estucado en máquina se caracteriza porque la estucadora se encuentra instalada dentro de la propia máquina de papel y se utiliza cuando no se requiere una calidad muy exigente en el estucado. Con estas máquinas se consigue un estucado brillante o mate, aunque lo más habitual es obtener papel estucado mate. Si se desea un mayor brillo se le realiza posteriormente un calandrado que, mediante un fuerte alisado de la superficie del papel, le proporciona más brillo. Este tipo de estucado se utiliza para libros de enseñanza, folletos, libros de instrucciones, etc.

Ventajas:

- Se evita el transporte de la bobina, reduciendo el riesgo de dañado.
- Se evita el almacenado intermedio de las bobinas de papel hasta su posterior aplicación del estucado.
- Ocupa menor espacio.
- Reduce la mano de obra.

Desventajas:

- Menor capa.
- Menos lisura superficial.



Entre los sistemas de estucado en máquina destacan:

- Size-press.
- Estucadora de rodillos (Gate-roll).
- Estucadora de labio soplador.
- Estucadora de varilla.
- Estucadora de cuchilla.

3.13.5. Estucado fuera de máquina

El método de estucado fuera de máquina se caracteriza porque se realiza como una operación completamente separada de la máquina de papel, en otro punto de la fábrica; es decir, que la estucadora no pertenece a la máquina de papel. Con este método se obtiene lo que se conoce como papel estucado tradicional.

Uno de los métodos más antiguos es el de la estucadora de cepillos. Con él, la capa de estucado se aplica con un cepillo, pulverizador o rodillo. La hoja pasa, a continuación, por un rodillo, y la capa se homogeneiza mediante una serie de cepillos que se mueven transversalmente al sentido de movimiento del papel.

Uno de los sistemas más especializados en el estucado fuera de máquina es el conocido como estucado de alto brillo, principalmente empleado en papeles para etiquetas y embalajes de alta calidad. En este sistema, durante la fase de secado, el papel se prensa sobre un cilindro de gran diámetro y con una elevada temperatura, donde se consigue su excepcional brillo y lisura, no siendo necesario el calandrado. El acabado brillante en los papeles de este tipo se consigue por calor.

Las ventajas de este método son las siguientes:

- Gran flexibilidad, pudiendo trabajar con diferentes condiciones de estucado, diferentes tipos de papel, etc.
- Al estar fuera de la máquina de fabricación, no le afecta para nada su funcionamiento (velocidad, paradas por avería, etc.).
- Proporciona mayor calidad en el estucado.

Se conocen dos sistemas de estucado de alto brillo:

- Sistema Warren.
- Sistema Champion



3.13.6. Variables que intervienen en el estucado

En el momento de realizar la aplicación de la salsa sobre el papel, la capa resultante va a estar condicionada por una serie de factores que es necesario regular:

- La **viscosidad de la salsa**. Esta variable depende de los siguientes factores:
 - o La temperatura.
 - o El tipo de ligante.
 - o El porcentaje de materia sólida.
 - o La velocidad de cizallamiento.
 - o Los espesantes.
- Las **características de la cuchilla**. En el empleo de la cuchilla, que suele ser de acero, influye:
 - o La forma.
 - o El espesor.
 - o La longitud.
 - o La elasticidad (una cuchilla flexible permite la aplicación de mayor cantidad de capa).
 - o El ángulo de aplicación (ángulo de contacto sobre el rodillo aplicador).
 - o La presión aplicada sobre la capa.
 - o La altura libre.
- El **rodillo de apoyo**. Respecto al rodillo podemos decir que influye:
 - o La dureza del material.
 - o La lisura de su superficie (cuanto mayor lisura tenga el rodillo, mayor lisura se conseguirá en el papel).
 - o Las deformaciones que puede sufrir.
 - o El tipo de recubrimiento.

3.13.7. Defectos en el estucado

Al final de una operación de estucado suelen aparecer y se pueden observar una serie de defectos que, gracias a la experiencia y el avance de la tecnología, va siendo posible corregir e incluso eliminar por completo.

A continuación vemos aquellos defectos que se dan con más frecuencia:

- Suciedades o motas en la superficie.
- Capa mal extendida.
- Marcas de fibras.



- Marcas de rodillos.
- Pegotes o cuerpos extraños (salpicaduras).
- Fajas oscuras (rodillos que no giran).
- Pegaduras (empalmes).
- Superficie áspera.
- Cráteres de espuma (demasiado antiespumante).
- Manchas de colorantes y grasas.
- Cortaduras en las orillas.
- Roturas y agujeros.
- Mala dispersión del pigmento (ojos de pez).
- Látex mal disperso (piel de naranja).
- Olores extraños.
- Capa quebrada.

3.14. Calandrado

Hay papeles que, tal y como salen de la máquina de papel y tras pasar por un proceso de estucado, ya son aptos para su utilización en procesos de impresión de tintas. Sin embargo, muchos otros, sobre todo aquellos que requieren un elevado acabado superficial, se les hace pasar por una operación denominada calandrado.

Con la operación de calandrado se pretende mejorar principalmente el **brillo del papel** y las **propiedades de impresión**. En la siguiente figura se puede ver una vista general de la máquina que realiza este proceso, y que se denomina **calandra**.



Figura I.3.63: Calandra

La calandra consta de una **serie de rodillos** (normalmente 12) colocados uno sobre otro y que giran haciendo pasar la hoja de papel entre ellos. Normalmente se alterna un rodillo de material duro (acero) y otro rodillo recubierto de material blando (material fibroso), siendo los de metal los que proporcionan el brillo al papel.

3.14.1. Tipos de calandrado

El acabado del papel, lógicamente, no siempre es el mismo. El cliente es el que marca el tipo de acabado requerido dependiendo de la utilización que le vaya a dar.

Los objetivos primordiales del calandrado son homogeneizar el espesor y dar uniformidad a la superficie del papel para conseguir una correcta absorción de tintas; sin embargo, no siempre es imprescindible ni deseado aumentar el brillo, ya que al aumentar éste disminuyen otras características del papel, como la blancura y la opacidad. También, en según que tipos de productos, un brillo en el papel impreso causa dificultades a la hora de leerlo.

Según el tipo de acabado obtenido con el calandrado se distinguen tres tipos de calandrado:

- **Calandrado semimate.** Se denomina así a cualquier técnica de calandrado usada para producir una superficie lisa (uniformizar la superficie y el espesor) con un aumento mínimo de brillo. Utiliza una calandra con menos rodillos (normalmente cuatro).
- **Calandrado de brillo.** En este caso, el papel pasa a través de una serie de zonas de prensado formadas por un rodillo relativamente blando y un rodillo muy liso, de acero rectificando, a alta temperatura.
- **Calandrado de alto brillo.**

3.14.2. Presión de calandrado

Como ya hemos visto, durante el calandrado el papel pasa a través de una serie de rodillos colocados verticalmente que efectúan una presión sobre el papel en el punto de contacto. Esta presión se logra por efecto de dos factores:

- El propio **peso de los cilindros.**
- Una **carga adicional** sobre el cilindro superior, producida por un cilindro hidráulico.

Por tanto, regulando la presión en el cilindro hidráulico se consigue controlar la presión que los rodillos ejercen sobre el papel siempre que sea necesario.

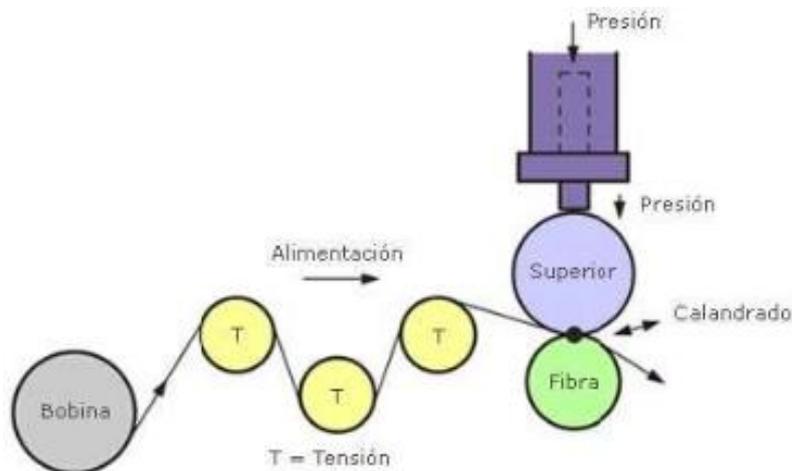


Figura I.3.64: Presión en el papel producida por los rodillos.

La presión actúa **comprimiendo el papel** entre los rodillos y esto hace que se obtenga una lisura y densidad uniforme en todo lo ancho del papel.



3.14.3. Características del papel calandrado

En este apartado veremos una serie de características en las cuales interviene el calandrado y que van a tener influencia en las posteriores utilidades que se den al papel:

- **Lisura.** Es un aspecto muy importante a la hora de imprimir sobre el papel y uno de los objetivos fundamentales del calandrado. Cuanto mayor sea la lisura mayor será el brillo y la absorción de tintas.
- **Espesor.** Con el calandrado disminuye el espesor del papel, a la vez que le da uniformidad en todo lo ancho de la hoja. El espesor se mide con calibres o micrómetros de alta precisión.

Características ópticas. Son una serie de características que se observan en función de la luz a que éste sea sometido. Tendremos en cuenta cuatro:

- **Color.** Cuando la luz se refleja sobre el papel nosotros recibimos radiaciones (colores). Si el papel sólo refleja radiaciones de un determinado color (absorbe las demás), nosotros veremos el papel de ese mismo color.
- **Blancura.** Cuando el papel refleja todas las radiaciones (colores) en la misma proporción nosotros lo apreciaremos de color blanco. Los pigmentos y aditivos favorecen la blancura.
- **Opacidad.** Depende de la cantidad de luz que atraviesa al papel. Un papel que deja atravesar poca cantidad de luz se dice que tiene una elevada opacidad.
- **Brillo.** Depende de la cantidad de luz que refleja el papel. Cuanto mayor sea la cantidad de luz reflejada (caso de una superficie lisa), mayor será el brillo en la superficie.

3.14.4. Defectos producidos en el calandrado

Algunos de los defectos más comunes que se dan en esta operación:

- Zonas en el papel con mayor espesor (bordones).
- Zonas con mayor humedad (fajas).
- Arrugas en el papel (acumulación del papel en puntos concretos debido a una tensión inadecuada).
- Roturas (puntos débiles del papel).
- Pérdida de características en los rodillos con revestimiento (dimensiones, elasticidad, homogeneidad, deformaciones por partículas duras o arrugas...).
- Oxidación y marcas en los rodillos metálicos



Para atajar estos defectos es necesario conocer su origen (motivo), detectarlos y corregirlos.

3.15. Bobinado

Los usuarios de papel necesitan que el papel les llegue de una forma adecuada a sus necesidades. Por ejemplo, en una imprenta se utilizan bobinas de papel con tamaños y diámetros apropiados para sus máquinas. Igual ocurre en la cortadora.

El papel que sale de la máquina de papel o el que sale de la calandra, en caso de realizarse el calandrado, se enrolla en forma de bobinas para facilitar su transporte y utilización en las demás operaciones. Cada una de estas bobinas, llamadas bobinas madre, son almacenadas hasta su siguiente operación, que será la de bobinado.

La operación de bobinado tiene la misión de cortar y rebobinar la bobina de la máquina, de gran diámetro (bobina madre), en bobinas de diámetro y anchura más pequeños (bobinas hijas). Este proceso se realiza en una máquina llamada bobinadora.

3.15.1. La Bobinadora

La bobinadora es la máquina donde se desarrolla la operación de bobinado. Se basa en un dispositivo mecánico que transforma la bobina madre en varias bobinas más pequeñas de diámetro, tamaño y dureza apropiados.

Estas características serán determinadas por los requerimientos del cliente o por las acciones que posteriormente se vayan a hacer (almacenado, transporte, reutilización).

Existen dos tipos de bobinadora, que son:

- La bobinadora **de dos tambores**.
- La bobinadora **con bobinado individual** (con un solo tambor central).

3.15.1.1. *Bobinadora de dos tambores*

Este tipo de bobinadora era la más común hasta que la aparición de la bobinadora con bobinado individual.

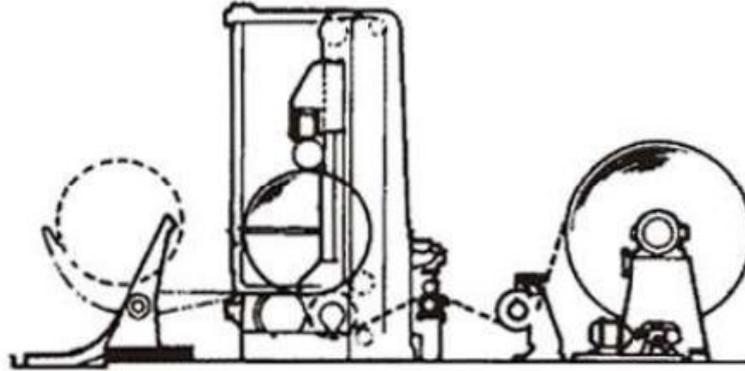


Figura I.3.65: *Bobinadora de dos tambores*

Los parámetros que nos indican la evolución del proceso de bobinado van variando a lo largo del mismo. Esta variación puede realizarse de dos modos: manualmente (accionando los comandos de control) o automáticamente (mediante sistemas de regulación).

Para corregir la estructura natural (no deseada) a la que tiende a formar la bobinadora de dos tambores se actúa regulando una serie de factores. Los factores básicos que intervienen son:

- Tensión.
- Carga.
- Par diferencial.

3.15.1.2. *Bobinadora con bobinado individual*

Este tipo de bobinadora es el que se está imponiendo sobre las bobinadoras de doble tambor. Su aspecto se puede ver en la siguiente figura.

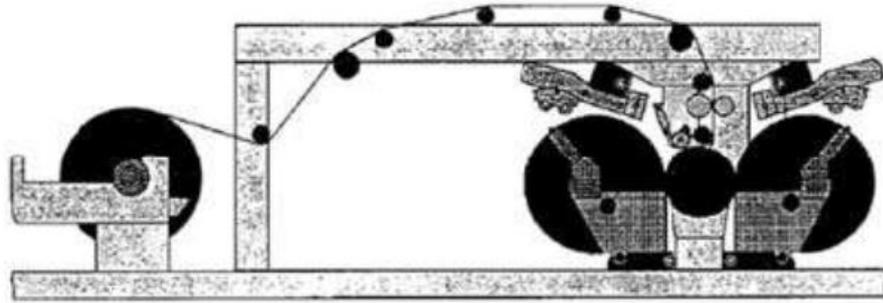


Figura I.3.66: Bobinadora con bobinado individual

En las bobinadoras de tambor central las variables que intervienen a lo largo del bobinado son:

- **Tensión:** En este caso se sigue el mismo procedimiento que en una bobinadora de doble tambor.
- **Presión:** Es la presión que existe en el punto de contacto del tambor con la bobina. Al inicio del bobinado, la presión con que la estación bobinadora aprieta contra el tambor central es mayor, y va disminuyendo paulatinamente al aumentar el diámetro de la bobina.

La ventaja que tenemos en este tipo de bobinadora es que la fuerza del peso (recordemos que el peso influye negativamente en la calidad de las bobinas al aumentar el diámetro) queda contrarrestada con la fuerza que ejerce la estación sobre el tambor central, y por consiguiente, la calidad de las bobinas es mayor con una bobinadora de tambor central.

3.15.2. Ensayos en la bobina

La bobina, una vez terminada, debe estar preparada para soportar los tratamientos y esfuerzos a que va a estar sometida: almacenamiento, transporte, etc.

La calidad de su formación depende de dos factores: el **papel base** (bobina madre) y el **desarrollo del bobinado**.

Una vez terminada la bobina se realizan una serie de ensayos que indicarán la calidad final de la misma. Estos ensayos son:

- Dureza.
- Diámetro.

- Densidad.
- Fuerza de fricción entre capas.

3.15.3. Defectos en el bobinado

En las bobinas se pueden encontrar algunos defectos de fabricación. Estos son los más comunes:

- Bobina floja (blanda) al principio del enrollamiento.
- Arrugas de bobinadora.
- Base irregular.
- Papel suelto.
- Desgarros en el borde

3.16. Cortado

El papel procedente de la máquina de fabricación se obtiene en forma de bobinas, y antes de que llegue a los clientes puede ser sometido a operaciones que le den las propiedades y dimensiones que éstos desean. El cliente, según la aplicación que le vaya a dar al papel, lo puede solicitar de dos formas:

- **En bobinas:** Se obtienen en la propia bobinadora con unas dimensiones determinadas (diámetro y ancho de bobina y longitud de la banda). El comprador lo solicita por kilogramos de papel.

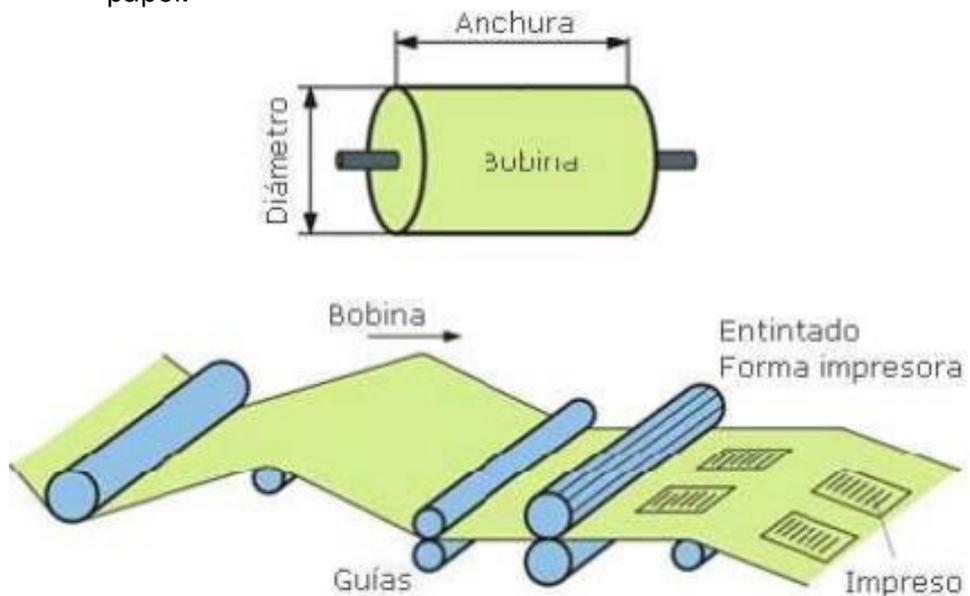


Figura I.3.67: Bobina de papel y método de impresión

- **En formatos o pliegos:** Se obtienen a partir de la bobina de papel, mediante el corte de ésta en piezas rectangulares cuyas dimensiones (ancho y largo) pueden ser normalizadas o no, según la petición del cliente. La forma más usual de solicitarlo es mediante resmas.

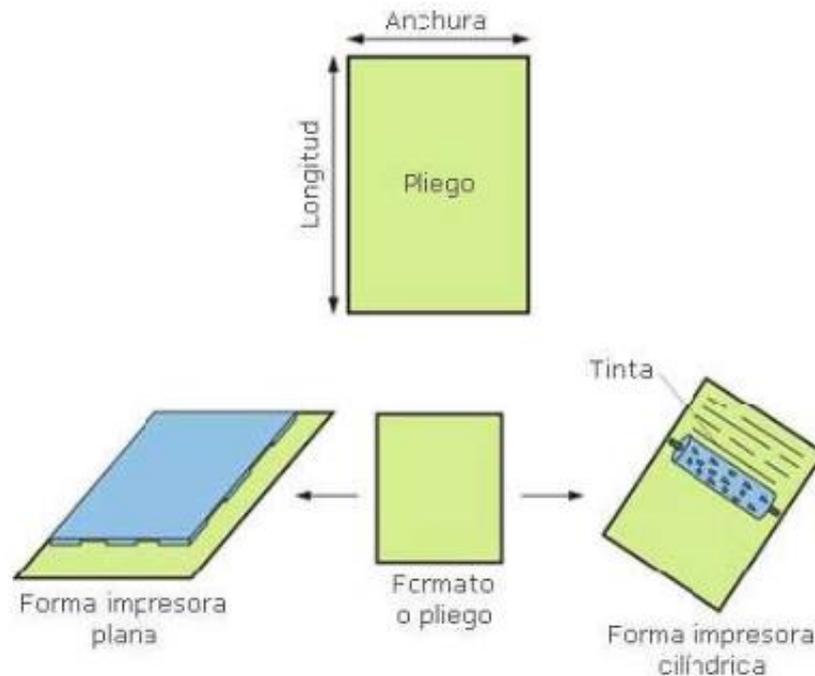


Figura I.3.68: Pliego y método de impresión

Por tanto, antes de que el papel llegue a los clientes en formatos o pliegos, éste es sometido a una operación de **cortado** en la que la bobina es transformada en hojas ajustadas a las medidas que el cliente pide para utilizarlas en otras máquinas.

Hay que tener en cuenta que no es lo mismo un papel con un formato de "70 x 100" que un papel con un formato de "100 x 70". Si las dos medidas se manipulan por igual, en una de ellas cambia la orientación de la fibra y, por tanto, varía el comportamiento de la hoja en la imprenta.

La cortadora es la máquina en la cual las bobinas de papel se transforman, mediante cortes, en una serie de formatos o pliegos con una longitud y anchura determinadas. Aunque existe una normalización de formatos, éstos pueden ser solicitados por los clientes de manera muy diversa, pudiendo ser o no normalizados.

La cantidad de pliegos obtenidos dependerá del tamaño original de la bobina y del tamaño que se desea obtener para cada pliego.

Aunque el proceso de cortado se realiza automáticamente, el operario es el encargado de ajustar los elementos, comprobar el correcto funcionamiento y mantener el orden y limpieza de las instalaciones.

En la fábrica deberá haber una correcta distribución de las diferentes fases para un buen desarrollo de la operación de cortado. Las fases en las que se divide la operación son:

- Desbobinado.
- Corte en dos fases.
- Detección de defectos.
- Transporte.
- Apilado.
- Operación de conteo.

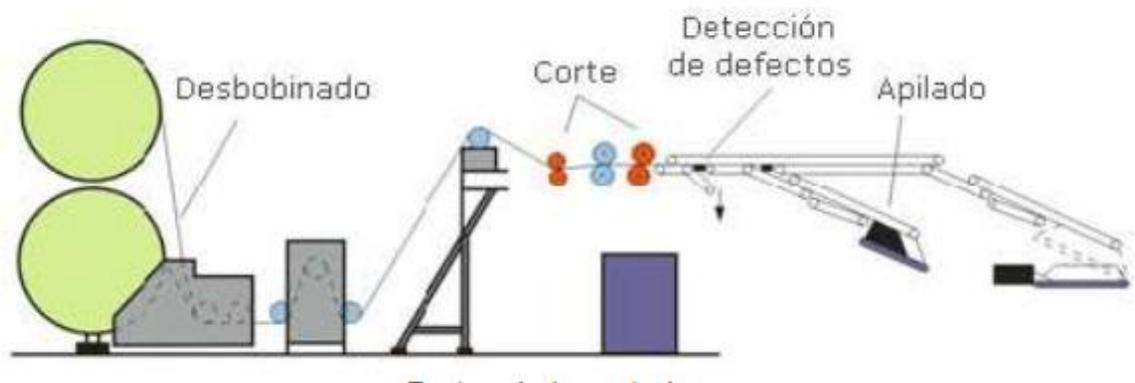


Figura I.3.69: Partes de la cortadora

3.16.1. Desbobinado

Para introducir el papel de las bobinas en la cortadora es necesario realizar el **desbobinado** de las mismas a una velocidad adecuada. Este desbobinado debe realizarse de manera continua y sin interrupción, ya que el trabajo en la cortadora debe ser constante. Es decir, en el momento en que las bobinas que están siendo utilizadas se agoten será necesario introducir otras nuevas para no interrumpir el proceso.

La manera de conseguir que no exista interrupción en el desbobinado es utilizando un mecanismo que permita tener desbobinando simultáneamente una serie de bobinas, y que en el momento en que éstas se terminen, se introduzcan, bien sea mediante una plataforma giratoria o bien mediante un desplazamiento lateral, otras nuevas que hasta ahora habían estado a la espera.

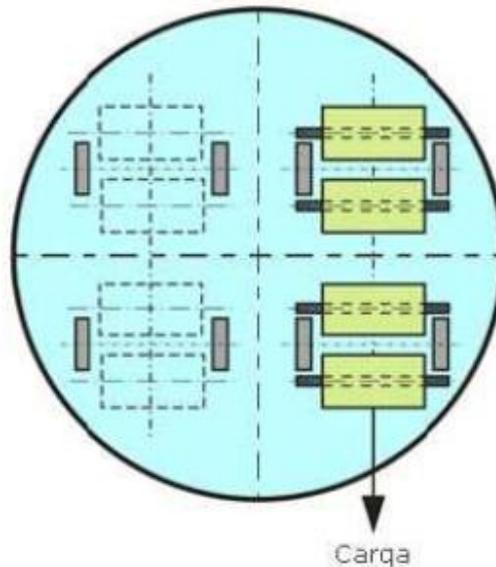


Figura I.3.70: Plataforma para carga de bobinas

3.16.2. Corte

A medida que se realiza el desbobinado del papel, éste pasa a través de las cortadoras para ser transformado en pliegos con las dimensiones deseadas.

Se diferencian dos tipos de corte, los cuales, hoy en día, se desarrollan en la misma máquina:

- **Corte longitudinal:** es el primero en realizarse y determina el ancho de los pliegos.
- **Corte transversal:** se realiza a continuación del corte longitudinal y determina la longitud de los pliegos.

3.16.2.1. Corte longitudinal

Se efectúa por medio de pares de cuchillas rotativas, que cortan el papel en tiras más estrechas, dando al pliego la **anchura final** del pedido. También realizan el **desbarbado** o recorte de los bordes exteriores. Cada par de cuchillas está formado por una cuchilla superior y otra inferior, perfectamente paralelas y ligeramente desplazadas entre sí, con lo cual el efecto de corte es similar al que se produce cuando cortamos un papel con unas tijeras.

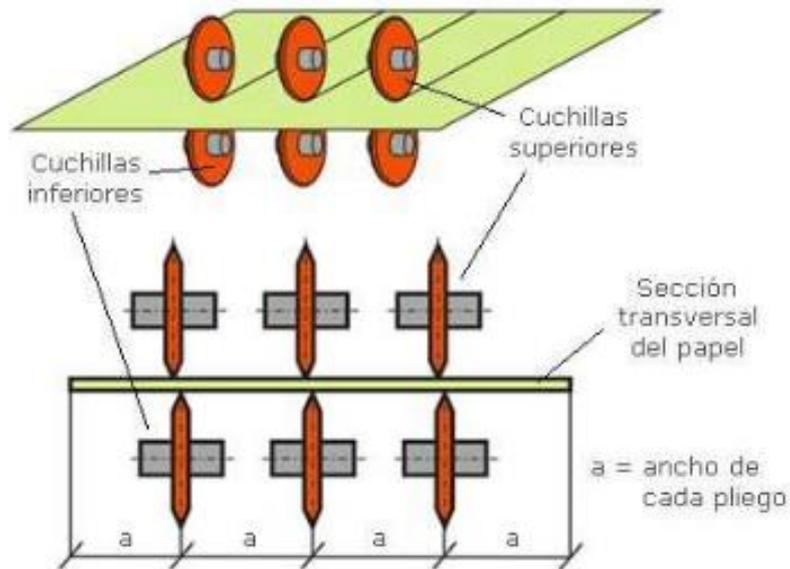


Figura I.3.71: Corte longitudinal de la bobina.

3.16.2.2. Corte transversal

Una vez que las hojas han sido cortadas en bandas longitudinales (ancho del pliego), éstas se cortan mediante un corte transversal para transformarlas en pliegos de una longitud determinada.

El corte transversal se realiza mediante cuchillas rotativas, de corte sincronizado, que son las que determinan la **longitud del pliego**. Esto se realiza haciendo pasar la banda de papel a través de unos tambores portacuchillas (ambos rotativos, uno superior y otro inferior) los cuales se regulan antes de la puesta en marcha. Las cuchillas van montadas en los tambores y fijadas mediante tornillos con un ajuste que ha de ser lo más preciso posible para que en el momento del corte no choque la cuchilla inferior con la superior.

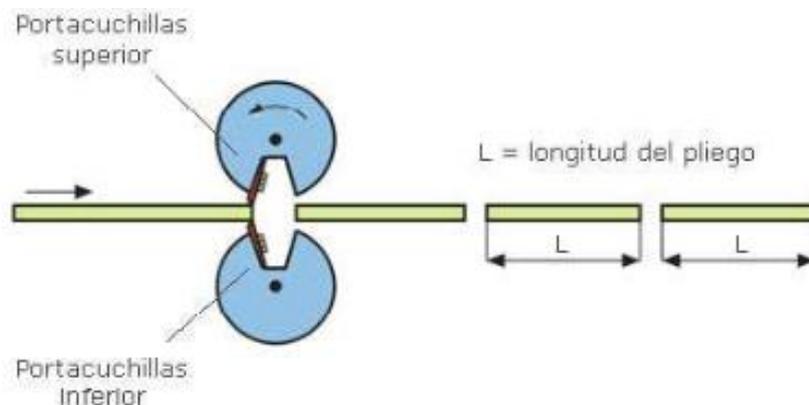


Figura I.3.72: Corte transversal de la bobina

La longitud del pliego se fija con la velocidad de la cuchilla rotativa, es decir, el tambor deberá dar una vuelta completa en el mismo tiempo en que el papel recorre la longitud de corte deseada. De este modo, cada vez que el tambor desarrolle una vuelta completa, la cuchilla realizará un corte en el papel determinando la longitud de cada pliego. Durante la operación, el corte del papel se produce al girar al unísono los dos tambores portacuchillas (superior e inferior).

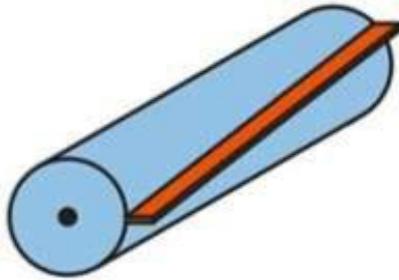


Figura I.3.73: Inclinación de la cuchilla en el tambor portacuchillas

Una vez que la hoja ya ha sido cortada se realizan las operaciones finales, que son la detección de posibles defectos, el transporte, el apilado y el conteo.

3.16.3. Detección de defectos

En la operación de cortado siempre pueden aparecer defectos, por lo que es necesario detectar los pliegos defectuosos y eliminarlos, ya que, si estos llegaran al producto final, el cliente tendría problemas a la hora de utilizarlos en la impresión. Se pueden encontrar dos tipos de defectos:

- **Propios de la bobina.** Son defectos que ya vienen en el papel antes de entrar a la cortadora: manchas, gramaje, espesores...
- **Producidos en la cortadora.** Son defectos que se detectan después de pasar por la cortadora: tamaños, arrugas, pliegues, desgarros.

Aunque existen sistemas manuales de detección (el operario lo detecta visualmente), hoy en día se utilizan equipos de **control automático** instalados en las máquinas cortadoras.



3.16.4. Transporte

Una vez que la banda de papel ya ha sido cortada y transformada en formatos con unas medidas determinadas se envían hacia la sección de apilado a través de unas **cintas transportadoras** accionadas mediante rodillos.

3.16.5. Apilado

Después de que los pliegos atraviesan la estación detectora de defectos, eliminándose aquellos que estuvieran defectuosos, los pliegos sin defectos se llevan sobre la cinta transportadora hacia la unidad de apilado, donde son agrupados, perfectamente escuadrados, para su embalaje y envío posterior.

Operación de Conteo

Ya cortado el papel, hay que señalar cuántas hojas hay en cada paquete. Para ello, antes de que los pliegos lleguen a la unidad de apilado se realiza el conteo que, de forma automática, permitirá saber el número de pliegos que se acumulan en la fase final.

4. Producción de papel reciclado

Este apartado está centrado en el papel reciclado como materia prima, ya que será la materia prima que alimentará el púlpel posteriormente diseñado. En él, después de una breve introducción se hablará de la materia prima y las etapas del proceso que difieren del proceso anterior explicado, como son la desintegración y el destintado, para finalmente comentar brevemente los requerimientos energéticos, los avances biotecnológicos, la gestión ambiental y el contacto de este tipo de papel producido con los alimentos.

4.1. Introducción

Las plantas de reciclado suelen estar integradas en una fábrica de papel. El proceso consiste en desfibrar el papel o cartón en agua, separar los contaminantes, acondicionar las fibras obtenidas por refino y por último reagruparlas formando un nuevo papel o cartón.



El desfibrado de papel recuperado (llamado repulpado) se efectúa en el púlper en un proceso que puede realizarse en continuo o discontinuo y a consistencia alta, media o baja.

La desintegración se completa en una etapa secundaria generalmente por medio de despastilladores. Las operaciones de desintegración deben evitar en lo posible la reducción del tamaño de los contaminantes, ya que esto complicará su posterior separación.

Después del desfibrado, hay varios sistemas de procesamiento dependiendo del grado de papel a producir y el tipo de empaste utilizado, estos sistemas de procesamiento se dividen en dos grandes categorías:

Procesos que aplican exclusivamente depuración mecánica, sin destintado. Se emplean sobre todo para fabricar cartón, cartulina, onda para cartón corrugado etc. Procesos que además de las etapas mecánicas de depuración incluyen etapas químicas como el destintado, además este puede estar seguido de una etapa de blanqueo. Estos procesos suelen emplearse para la fabricación de papel periódico, papel de impresión y copiado, papel de revista supercalandrados (SC), sanitarios y absorbentes (tissue), y algunos tipos de cartulinas o de pulpa destintada (DIF) de mercado.

La separación de contaminantes se hace por etapas de tamizado y/o depuración ciclónica. Al igual que la etapa de desfibrado, la etapa de depuración debe realizarse intentando no reducir el tamaño de los contaminantes. Esta precaución debe tenerse no únicamente con las partículas sólidas contaminantes, sino también con los agregados de tinta (dirt specks) y los materiales pegajosos (stickies), que deben mantenerse en un rango de dimensión lo suficientemente grande. Además, se debe evitar la fragmentación excesiva de la tinta porque, de lo contrario, en la etapa de flotación se reduciría la probabilidad de eliminación de ésta y aumentaría su redeposición en las fibras.

Tras la etapa de depuración, en ocasiones se realiza una dispersión en caliente a alta consistencia para reducir el tamaño de las partículas de los contaminantes termofusibles. Esto evita dificultades en el proceso debido a la existencia de materiales pegajosos. Además, esta dispersión en caliente evita la aparición de manchas o impurezas en el papel final que llegan a ser detectables por el ojo humano. En las plantas de producción de pasta destintada (DIP) esta etapa es aplicada después del destintado para dispersar las partículas de tinta remanentes y, además, es aprovechado para el mezclado de los químicos de blanqueo.

Por último, dependiendo del tipo de papel que se quiere producir, será necesario un tipo de refino u otro, por ejemplo, si se desea producir papeles tipo onda de corrugado se requieren de la aplicación de refino, mientras que si lo que se produce es cartón o papel blanco el refino no es necesario o no es conveniente.

4.2. Materia prima

Nuestra materia prima es el propio papel o cartón, que se recupera a través de:

- Recolección doméstica y a nivel de pequeñas empresas
- Recolección en operaciones industriales o de comercio, sitios de desembalaje como supermercados, oficinas, y en las plantas de conversión como imprentas o plantas de cartón corrugado.

Cuando la materia prima llega a la fábrica se lleva a cabo el siguiente proceso:

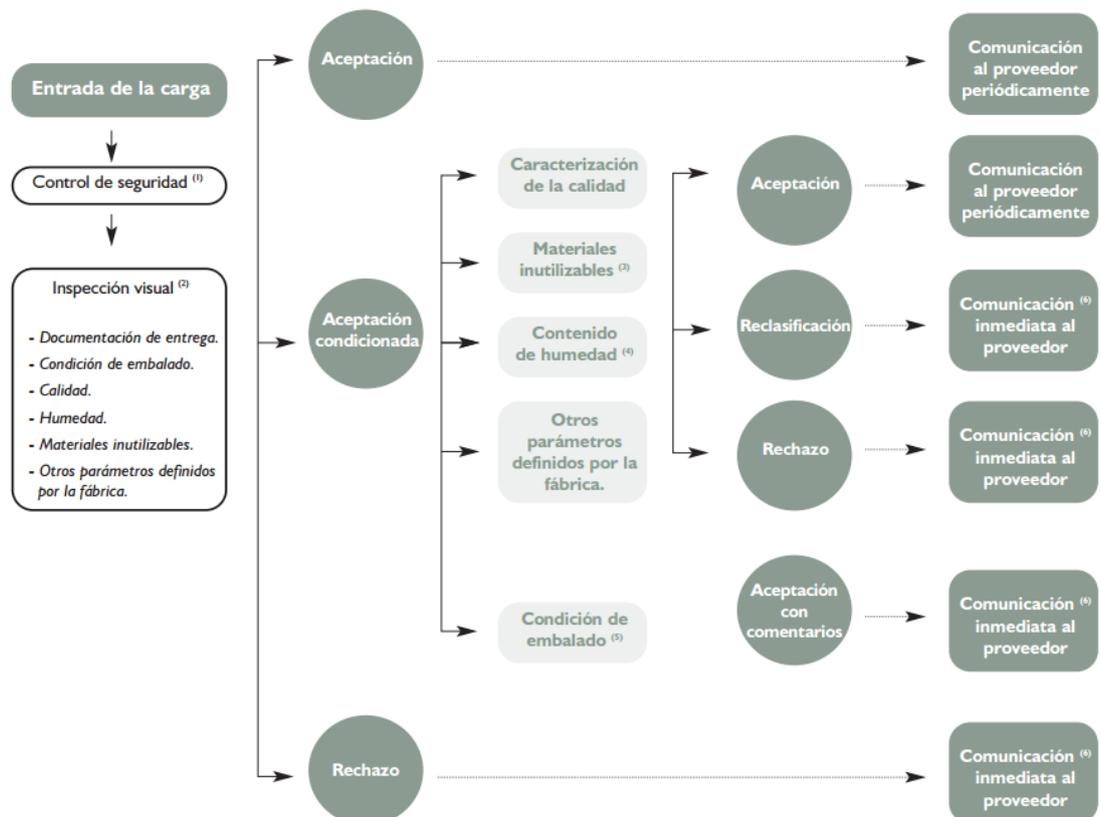


Figura I.4.1: Inspección global de la calidad del papel recuperado



Además, se diferencian dos tipos de recolección:

Pre-consumo: es habitual recuperarlo de algunos recortes en imprentas plantas de cartón corrugado, incluso como excedentes de publicaciones no vendidas pasadas de fecha. Este material tiene una presencia muy baja de contaminantes, lo que facilita el proceso de reciclado

Post-consumo: es la forma más habitual de reciclaje de papel y cartón, suele tener una cantidad de contaminantes mucho mayor, ya que ha tenido una vida útil que ha finalizado.

4.2.1. Grados de papel recuperado

Existe una lista europea de calidades estándar de papel y cartón recuperado que facilita su clasificación.

Grupo 1 Calidades ordinarias:

En él se encuentran las mezclas de papel sin clasificar, mezcla clasificada, cartón gris, cartón corrugado de supermercado, cartón corrugado mezcla (OCC), revistas devolución, mezclas de periódicos y revistas, guías telefónicas

Grupo 2 Calidades medias:

Constituido por papel de periódico, periódico nuevo, refiles blancos livianamente impresos, refiles blancos fuertemente impresos, papeles impresos de oficina papel oficina clasificado, libros sin pulpa mecánica, revistas coloreadas libre de pulpa mecánica, papel autocopiativo, cartón blanco sin pulpa mecánica cubierto de polietileno (PE), otros cartones cubiertos con PE.

Grupo 3 Calidades altas:

Refiles mezcla suavemente impresos, refiles blancos, papeles de escritura de oficina, papel kraft blanqueado impreso, papel recubierto libre de pulpa mecánica y suavemente impreso, cartón multipliego blanco conteniendo pulpa mecánica, papel periódico blanco (no impreso), papel blanco basado en pulpa mecánica no impreso, papel blanco libre de pulpa mecánica no impreso, refiles blancos con un 60% de pulpa mecánica y refiles blancos libres de pulpa mecánica.



Grupo 4 Calidades kraft:

Refiles de corrugado nuevo, corrugado no usado, cartón corrugado usado fabricado con papel kraft liner, cartón corrugado usado con al menos un papel kraft liner, bolsas kraft usadas, bolsas kraft no usadas, papel o cartón kraft usado, papel kraft nuevo.

Grupo 5 Grados especiales:

Mezcla no clasificada, cartón de embalaje de líquidos, papeles de envolver (laminados), etiquetas de papel resistente en húmedo, papeles blancos con resistencia en húmedo.

La lista completa se puede consultar en el **Anexo II**.

4.2.2. Limitaciones de las fibras recicladas

El reciclaje de papel casi siempre viene acompañado con una mezcla de diferentes tipos de fibras, lo que provoca la pérdida de algunas propiedades específicas que pueden obtenerse en las pulpas vírgenes.

Sin embargo, ese no es el principal inconveniente, los procesos de reciclado en ocasiones tienen una cantidad excesiva de fibras cortadas y finos, debido a las sucesivas desintegraciones y operaciones de depuración y refinado. También pueden tener acumulación carbonato de calcio, caolines y talcos, lo que aumenta el peso sin contribuir al aumento de la resistencia del papel o incluso acumulación de materiales extraños como aceites, almidón seco, pigmentos de tintas etc que recubren a las fibras interfiriendo con las uniones.

Debido a esto, la pulpa de reciclado normalmente presenta una reducción en drenabilidad, lo que puede afectar a la velocidad de la máquina papelera.

La principal pérdida de propiedades papeleras la produce el secado que han sufrido las fibras en ciclos de uso anteriores.

La presencia de los extractivos lipofílicos puede afectar considerablemente al enlace interfibrilar de las fibras recicladas

El contenido de extractivos lipofílicos en pulpas kraft es bajo, del orden del 0,3 al 0,1% siendo decrecientes con el nivel de deslignificación, pero el contenido superficial es muy superior, y la proporción de



superficie de las fibras que está cubierta con estos extractivos puede llegar al 20%.

La presencia de extractivos puede tener lugar durante el pulpado, las sales de sodio de ácidos grasos de cadena larga pueden formar, sobre el final de la digestión, micelas que se rompen al reducirse la temperatura por debajo de niveles de estabilidad.

El secado puede producir una migración de estos materiales y su deposición en la superficie de las fibras con consecuencias negativas en la capacidad de enlace interfibrilar.

El refino mecánico es un recurso tradicionalmente aplicado para la recuperación de sus propiedades papeleras, particularmente para pulpas no blanqueadas. No obstante, la drenabilidad de la pulpa reciclada es adicionalmente reducida por la nueva generación de finos. Si bien existen importantes variables de refino, como es la operación a alta consistencia de pulpa, el hecho es que dicha pérdida de drenabilidad limita la intensidad de refino que puede aplicarse.

Una alternativa habitualmente utilizada es el agregado de agentes de resistencia en seco como almidón catiónico o poliacrilamidas para mejorar la resistencia específica de enlace de las fibras.

El uso de algunas enzimas puede ser beneficioso para reducir la presencia de stickies, reducir de la demanda de energía de refino, aumentar la drenabilidad y mejorar algunas de las propiedades del papel en general. En el apartado 3.6 se verán algunos avances biotecnológicos para mejorar el proceso.

Por último, el papel reciclado tiene algunas limitaciones a la hora de ponerlo en contacto con alimentos. Además de limitaciones en el contenido de ciertos compuestos, el uso de papel reciclado está prohibido para algunos alimentos con elevado contenido de humedad o grasa.

Una etapa de dispersión en caliente, o una etapa de blanqueo para el caso de los papeles blancos, reducen la contaminación por microorganismos si el papel tiene con fin aplicaciones alimenticias



4.2.2.1. *Efectos de la operación de secado sobre la calidad de las fibras*

La principal limitación del papel reciclado es la menor resistencia que presenta en comparación con esas mismas fibras en su estado virgen, que no han sido secadas.

En función de las condiciones de formación, de secado y de cómo ha sido usado ese papel, sus fibras presentan una reducción de la calidad del papel. Como consecuencia del secado, las fibras tienen menor capacidad de absorción de agua y de conformarse en la formación de papel.

La composición química no se altera por los ciclos de secado, pero el hinchamiento de la pared se reduce, lo cual es asignado a la unión durante el secado de las microfibrillas, solo parcialmente reversible al rehidratar la fibra. La unión entre las fibrillas de la pared por efecto del secado ha sido señalada como la causa de una pérdida de elasticidad de las fibras.

Cuando el secado se realiza sin restricciones los retorcimientos y quiebres se incrementan notoriamente afectando así la resistencia del papel. El espesor de pared y el área transversal de las fibras se reducen lo cual también puede ser asignado a la unión entre microfibrillas.

Otro efecto es la unión parcialmente reversible de las microfibrillas de la fibrilación externa sobre la pared reduciendo la fibrilación externa y así la resistencia de enlace

Por último, la migración y redistribución de compuestos hidrofóbicos hacia la superficie de la fibra es la causa de pérdida de resistencia específica de enlace.

La estructura de la pared de las fibras se altera en el ciclo de uso debido a que las microfibrillas, originalmente separadas en la fibra virgen, se unen en el secado. Este es un proceso característico de las pulpas de bajo rendimiento. Las fibras celulósicas provenientes de pulpos mecánicos presentan menores efectos del secado.

El refinado de pulpas de reciclado genera finos rápidamente y reduce la drenabilidad que puede ser limitante de la velocidad de máquina en la producción industrial de papel en base a fibra reciclada.



La tabla I.4.1 indica los efectos del secado sobre las propiedades químicas y físicas de pulpas químicas que han sido señalados por diferentes autores.

Tabla I.4.1: Efectos del secado en las propiedades físicas y químicas de las pulpas químicas

Propiedad física o química	Efecto	Bibliografía	Causas	Consecuencias
Química global	-	Bouchard y Douek (1993)	-	-
WRV	Disminuye	Nazhad (1994)	Enlace entre microfibrilas	Menor Calidad papelera y menor aptitud al refino
Flexibilidad de fibra según el método de Tam Doo y Kerekes	Aumenta	Alanko (1993)	Retorcimientos y quiebres	-
Módulo elástico (tenacidad)	Aumenta	Scallan y Tigerston (1992)	Enlace entre microfibrilas	Menor Calidad papelera y menor aptitud al refino
Longitud de fibra	-	Akerman (2000 p.364)	-	-
Longitud de fibra efectiva según la clasificación en húmedo	Disminuye	Horn (1975)	Retorcimientos y quiebres	Menor calidad papelera
Longitud de fibra efectiva según método óptico	Disminuye	Page y col. (1985)	Retorcimientos y quiebres	Menor calidad papelera
			Microcompresiones	Menor calidad papelera
Longitud de fibra efectiva secada sin restricción a la contracción	Disminuye	Fors (2000)	Retorcimientos y quiebres	
Espesor de pared y área transversal	Disminuye	Jan y col (1995)	Enlace entre microfibrilas	-
Fibrilación externa y resistencia específica de enlace	Disminuye	Ackermann (2000)	Enlace entre microfibrilas y en la superficie	Menor calidad papelera
Resistencia específica de enlace	Disminuye	Nazhad (1994)	Migración de compuestos hidrófobos a la superficie	Menor calidad papelera



4.3. Desintegración o pulpeado

4.3.1. Equipo utilizado para desintegrar la pulpa

La desintegración del papel reciclado se lleva a cabo en los pulperos o desintegradores, que pueden trabajar de dos formas distintas: en proceso continuo o en proceso discontinuo. Ambos procesos pueden seleccionarse para trabajar a alta, media o baja consistencia presentando diferentes ventajas e inconvenientes.

La consistencia es una variable del proceso de destintado que tiene un efecto considerable en los resultados finales.

Efectuar las desintegraciones a alta consistencia permite:

Obtener una buena individualización de las fibras en la suspensión papelera sin fragmentar de forma excesiva los contaminantes presentes.

Reducir el consumo específico de energía y el tiempo de desintegración

Mejorar el efecto de los productos químicos provocando una mejor liberación y dispersión de las tintas de impresión.

Desintegrar a alta consistencia incrementa el esfuerzo de cizalla o rozamiento entre fibras reduciendo el tiempo necesario para el desfibrado. Esto se traduce en un consumo específico de energía inferior. Esta fricción fibra-fibra intensa es beneficiosa, sobre todo para el destintado, ya que también ayuda al desprendimiento y puesta en suspensión de las partículas de tinta de la superficie de las fibras o del estucado.

En la desintegración a baja consistencia (3–8%), la mayor parte de la energía suministrada se utiliza para mantener en movimiento grandes cantidades de líquido y no para la separación directa de las fibras. Trabajar con pulperos a baja consistencia tiene otras desventajas importantes entre las cuales destacan el elevado consumo de energía, la alta fragmentación de los contaminantes y la poca eficacia de los reactivos químicos ya que la velocidad de difusión es mucho más lenta.

Esto se traduce en que el ahorro conseguido desintegrando a consistencias altas (15–18%) respecto a unas consistencias bajas del

4-5% oscilan alrededor del 20-35% de energía eléctrica, 40-70% de vapor y 20% de productos químicos.

Debido a esto, desde mediados de los años ochenta la tendencia de la industria de destintado de papeles recuperados fue la de convertir los pulperes de baja consistencia en pulperes discontinuos de alta consistencia.

Esta tendencia cambio hacia el uso de los pulperes tambor presentes en la mayoría de las instalaciones más modernas de destintado.

La ventaja más importante que presentan los pulperes continuos respecto a los discontinuos es la mayor capacidad de operación debido a la eliminación de los tiempos de carga y descarga y el hecho de que no se necesitan tinajas de almacenamiento demasiado grandes. En cambio, por lo que respeta a los productos químicos empleados, en la desintegración en continuo, estos tienen que ser universales para que sean eficientes sobre cualquier tipo de papel y además deben ser añadidos de forma constante.

Todo ello implica un funcionamiento continuo de todos los equipos, bombas, válvulas y tuberías, así como un elevado coste de aditivos químicos.

En el pulpeado en continuo, la variación de la calidad del material de entrada se tiene que solucionar con etapas posteriores, por ejemplo, de despastillado.

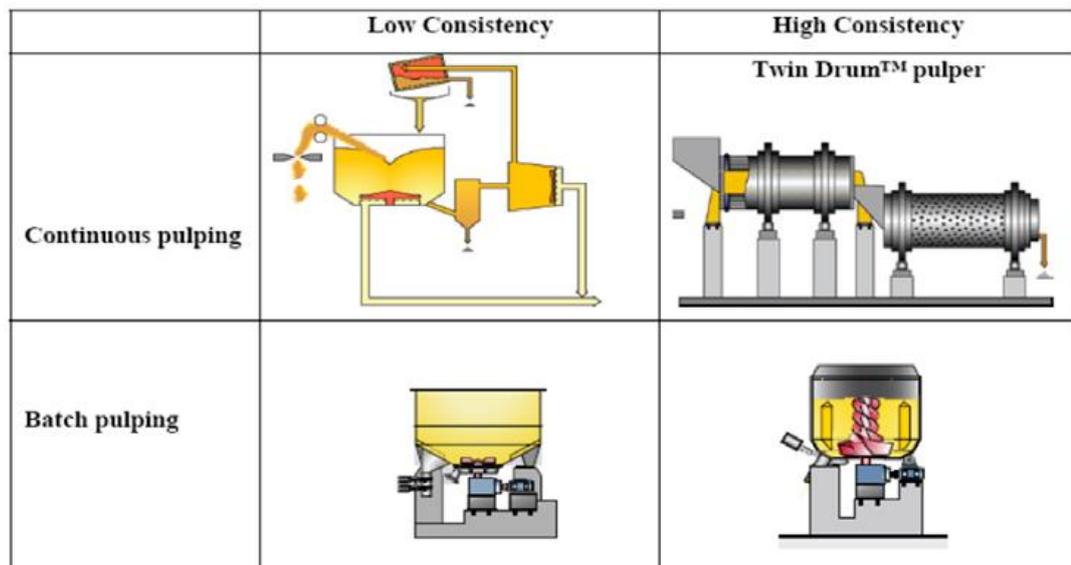


Figura I.4.2: Tipos de púlper

4.3.1.1. Equipos para la desintegración en discontinuo

Los equipos que trabajan en discontinuo (batch pulping) normalmente están formados por un cilindro o tina de acero con un rotor concéntrico, con los correspondientes elementos verticales o deflectores, así como guías horizontales que sirven para facilitar la circulación del flujo.

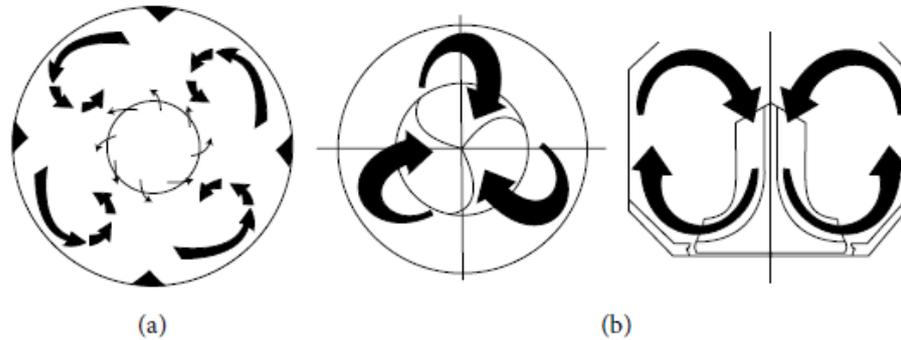


Figura I.4.3: Movimientos de la suspensión en un púlper discontinuo a) baja consistencia (Fallows, 1996) b) alta consistencia (Koffinke, 1983).

Los rotores que se utilizan para la desintegración a baja consistencia, tanto en proceso continuo como discontinuo, se corresponden con los de la fotografía de la siguiente figura.



Figura I.4.4: Agitador para desintegrar a baja consistencia



Figura I.4.5: Modo de funcionamiento del agitador

Normalmente son rotores planos de rozamiento con espacios muy próximos entre la platina de extracción y el rotor. Este rotor fuerza los fajos de fibras hacia la parte inferior donde la acción cortante y la intrusión de la pasta en los agujeros de la platina de extracción provocan el desfibrado.

Las velocidades periféricas de estos rotores suelen estar entre los 13 y 22 m/s. En la mayoría de los casos, los púlpers a baja consistencia operan en continuo con una eliminación constante de casi la totalidad del stock desintegrado a través de la platina de extracción.

El diámetro de los agujeros de la platina de extracción se puede optimizar teniendo en cuenta el efecto que tendrán en las etapas posteriores los grumos que se dejen pasar en esta operación. Para evitar una concentración excesiva de material no deseable en púlpers que funcionen en continuo, es necesario eliminarlos. Una parte de la suspensión se extrae del púlper y se bombea hacia púlpers secundarios o tamices de disco que actúan como despastilladores.

Los equipos que trabajan en discontinuo a alta/media consistencia, son conocidos como púlpers helico por la forma de hélice que tienen los rotores utilizados.



Figura I.4.6: Púlper de media o alta consistencia

Toda la zona ocupada por el rotor dentro del púlper se considera zona de desintegración a alta consistencia. Los elementos de recirculación tipo espiral están colocados de tal forma que se genera un movimiento de fuerzas hidráulicas horizontales y verticales dentro de la tina, capaces de inducir la turbulencia y aceleración necesarias a la suspensión.

En estos púlperes discontinuos, una vez pasado el tiempo de desintegración necesario o bien, una vez alcanzado el contenido en grumos predeterminado, se vacían totalmente en una única operación. Esto incluye la separación de las partes más groseras y un despastillado posterior adicional.

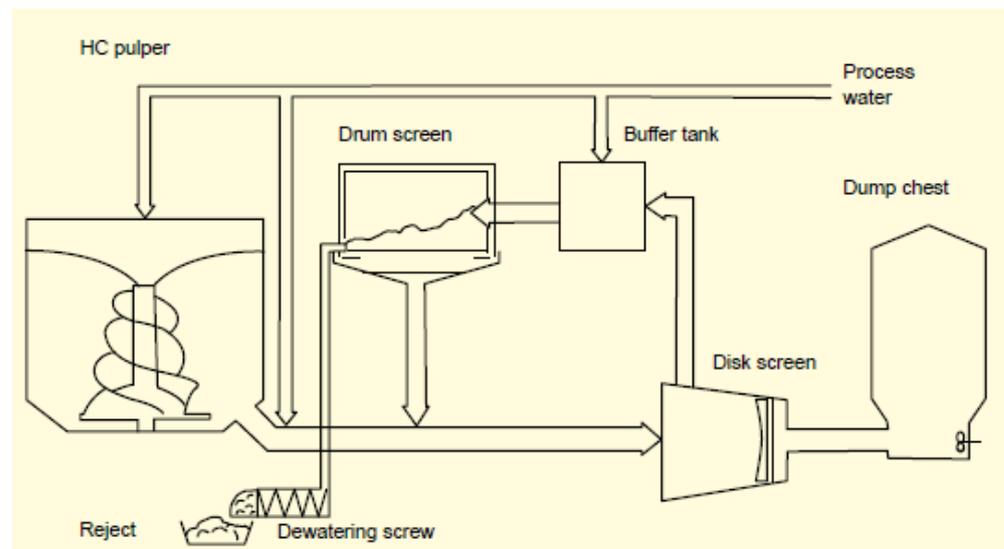


Figura I.4.6: Sistema completo de pulpeo a alta consistencia para papel recuperado

4.3.1.2. Equipos para la desintegración en continuo

En el apartado anterior se ha detallado que el proceso de desintegración a baja consistencia generalmente es continuo con salida constante del stock desintegrado a través de la platina de extracción, extrayendo una parte de la suspensión del púlper y bombeándola hacia púlperes secundarios o tamices de disco que actúan como despastilladores.

Los equipos estrella para la desintegración en continuo son los púlperes tambor (drum pulpers). Estos equipos trabajan a alta consistencia y están formados por un tambor rotatorio ligeramente inclinado que mueve la suspensión en sentido axial desde la parte superior hacia la inferior generando fricción mecánica dentro de la suspensión fibrosa.

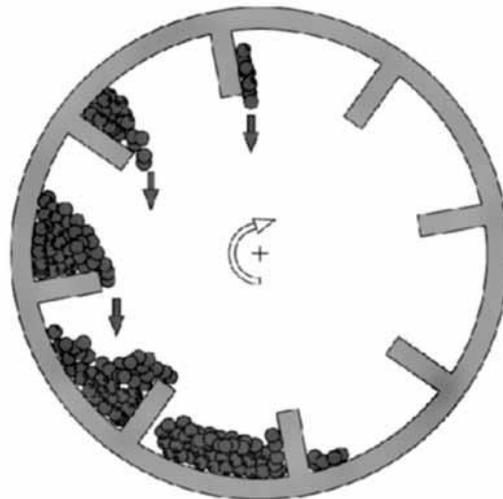


Figura I.4.7: Movimiento de la suspensión dentro de un pulper de tambor

Estos púlperes ligeramente inclinados (alrededor de 1°) giran a velocidades de 100 - 120 m/min con diámetros de 2,5 a 4 m y longitudes de 15 hasta 40 m.



Figura 1.4.8: Púlper tambor de Voith

Requieren mucho más espacio que los púlperes discontinuos de media y alta consistencia.

El movimiento periférico viene dado por fricción neumática o a través de engranajes. El tambor, tal como se observa en el esquema, tiene dos zonas, una para la puesta en suspensión o desintegrado (Drum pulper) y otra para el tamizado (Drum screen) que pueden formar una unidad compacta o estar separadas y girar en dirección contraria. La zona de puesta en suspensión o pulpeado ocupa las dos terceras partes de la longitud del tambor. El resto se utiliza para el tamizado. El tambor está ligeramente inclinado para que el contenido avance axialmente desde la zona de desintegración a la de tamizado, con un tiempo de retención de unos 20 minutos.

El púlper tambor trabaja a consistencias entre el 14% y el 20% en la zona de desintegración. A medida que el tambor gira, la suspensión cae libremente de arriba hacia abajo experimentando grandes fuerzas de cizalla. Puesto que estas fuerzas son mucho más débiles que en un púlper discontinuo, el tamaño de los contaminantes se mantiene bastante grande para ser posteriormente tamizados. Los productos resistentes a la humedad que se encuentren en las mezclas de papel recuperado no se pondrán en suspensión y terminarán siendo eliminados como deshecho.

El púlper tambor de la Figura 1.4.8 incorpora la modificación tecnológica propuesta por Müller (2000) para Voith Paper. Consiste

en un tambor rotatorio alrededor de un centro estacionario con un perfil de D. El tambor y la pared del dispositivo central forman un canal de desplazamiento semianular dentro del cual el material es arrastrado hacia arriba desde el fondo del púlper, tal como se observa en la siguiente figura:

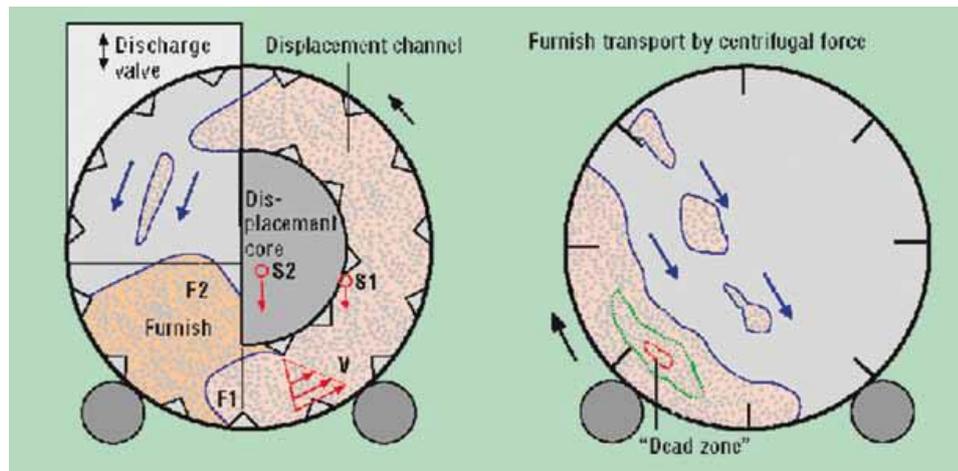


Figura I.4.9: Movimiento del stock en el púlper de tambor TwinDrum™ de Voith comparado con el púlper de tambor convencional (derecha).

Las fuerzas de cizalla dentro del canal de desplazamiento generan intensas fuerzas de fricción entre fibras, asegurando una buena mezcla y posterior descenso de la pasta.

La pasta circula por encima del dispositivo central y cae al fondo por ambos lados. Este movimiento continuado de amasado, mojado y ablandado a lo largo del tambor asegura una buena desintegración. Las aplicaciones más comunes de los púlperes tambor se centran en los stocks de papeles recuperados que posteriormente son destinados a la producción de pasta destintada (DIP), generalmente periódicos (ONP) y revistas (OMG), así como calidades marrones con baja resistencia en húmedo.

4.3.2. Fuerzas que intervienen en la desintegración de la pulpa

El desfibrado del papel recuperado tiene lugar de dos formas diferentes: por rozamiento mecánico y por efecto hidráulico.

El desfibrado por rozamiento mecánico consiste en someter la suspensión de pasta a múltiples tratamientos hidromecánicos cortos. Esta acción tiene lugar a gran velocidad y cerca de los elementos rotatorios y del plato fijo. Los cambios en la velocidad, la multiplicidad y elevada frecuencia de los remolinos y las zonas de cambio de presión generadas entre el rotor y el plato fijo provocan el desfibrado. Estas fuerzas están presentes cuando el papel está simultáneamente cerca y haciendo fricción con las partes mecánicas estáticas y rotatorias.

El desfibrado por efecto hidráulico se refiere a la interacción entre las fibras, inducida por diferentes perfiles de flujo a diferentes velocidades. En una suspensión acuosa de fibras, se originan localmente fuerzas de cizalla provocadas por las variaciones locales de viscosidad debido a la distribución no uniforme de las fibras en el púlper. En suspensiones de elevada consistencia el movimiento tiene lugar en forma de gradiente. Cada punto tiene su propia velocidad, y por lo tanto, su propio gradiente individual de velocidad. Estas velocidades son siempre inferiores a las que se consiguen más cerca del rotor.

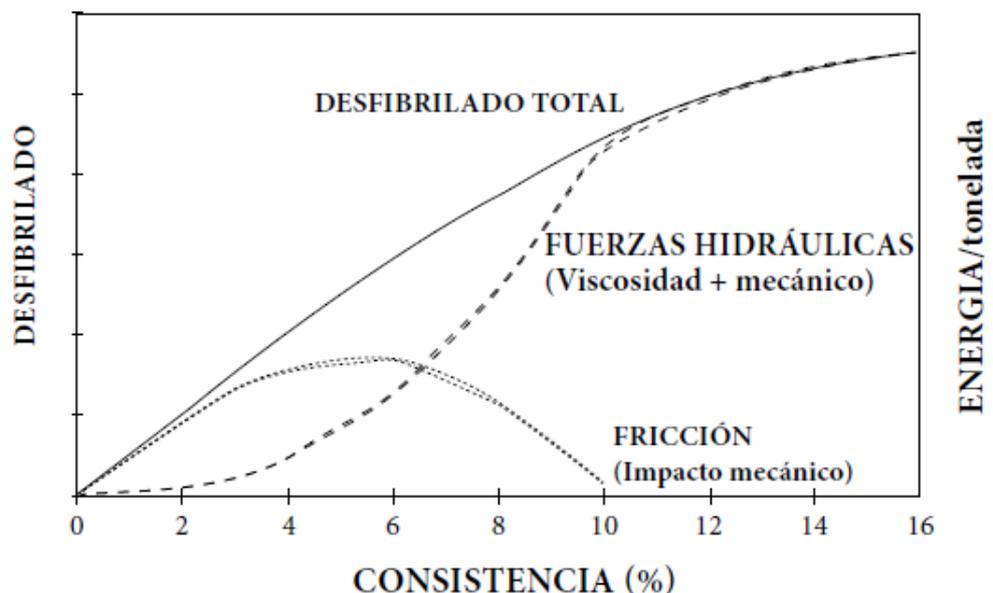


Figura I.4.10: Efecto de la consistencia sobre el desfibrado y consumo de energía



Como podemos observar en la figura I.4.10, cuando la consistencia de desintegración o pulpeado aumenta, el efecto de rozamiento pierde su intensidad y en cambio, la interacción entre fibras se vuelve cada vez más pronunciada, porque las fibras están más próximas entre ellas y más próximas a otras partículas sólidas. La interacción entre fibras continúa aumentando con la consistencia hasta que la viscosidad es tan elevada que impide que haya diferencias de velocidad. Las fuerzas de fricción entre fibras son mucho menos intensas que las fuerzas de impacto, pero mucho más frecuentes.

En 1984 Siewert propuso que el desfibrado podía entenderse como el producto de las fuerzas de tracción que actúan sobre el papelote o material a desintegrar. Estas fuerzas de tracción se producen cuando un trozo de papel es sujetado por una parte estática del púlper y el resto está en movimiento. También surgen fuerzas de tracción cuando una parte del material a desintegrar se fija sobre un elemento mecánico estático y la otra es sometida a una acción de cizalla por parte de la suspensión. La magnitud de las fuerzas de tracción depende de la inercia de los grumos y de la viscosidad aparente de la suspensión. También se generan fuerzas de tracción cuando un trozo de papel o grumo penetra entre dos corrientes de la suspensión que se mueven en sentido opuesto. Estos tres tipos de fenómenos tienen lugar de forma simultánea.

Todas estas fuerzas que actúan en el púlper se pueden caracterizar por su magnitud, frecuencia, naturaleza y lugar donde son inducidas hacia los grumos. La resistencia del papel a estas fuerzas depende de su composición, tipo de fabricación y de la extensión con la cual el papel ha estado en contacto con el agua.

Hay diferentes métodos de generación de estas fuerzas que actúan sobre los grumos:

- **Fuerza inducida por efecto de impacto:** Se trata de una fuerza de rozamiento mecánico, producida entre el rotor del púlper y los deflectores localizados por debajo o alrededor de la periferia del diámetro exterior del rotor. Estos elementos están próximos, pero no se tocan y esto provoca que la pasta sea hidráulicamente forzada hacia este espacio confinado donde el impacto de las fibras sobre estas partes promueve el incremento de velocidad sobre la pasta.
- **Fuerza inducida por efecto viscoso:** En este caso, la suspensión que envuelve el grumo tiene una velocidad relativa diferente. Las fuerzas viscosas arrastran el grumo y lo rompen. La interacción entre grumos aumenta con la

consistencia a medida que se alejan de la zona de rozamiento de alta turbulencia debido al rozamiento entre los sólidos que se mueven a diferentes velocidades y direcciones. Las fuerzas de viscosidad actúan lejos de las partes mecánicas.

- **Fuerza inducida por efecto de aceleración:** Se da una interacción entre las fibras debida a las diferentes corrientes de flujo que hay en el depósito. Si una parte del grumo es captado por el movimiento del rotor, la parte restante es arrastrada por una aceleración violenta. El grumo es sometido a un fuerte estrés (desfibrado hidráulico) que dependerá de la aceleración de la suspensión y de la inercia al desplazamiento de la parte arrastrada.

Con el fin de someter el grumo al esfuerzo cortante, tienen que actuar dos fuerzas de diferente magnitud. Cualquier combinación de los tres métodos que se han citado se puede aplicar sobre un grumo de fibras celulósicas.

Tipo de fuerza inducida	Acción	Símbolo
Impacto	Grumo en contacto con rotor y deflectores	
Viscosidad	Suspensión con velocidad relativa respecto al grumo	
Aceleración	Reacción lenta del grumo a una aceleración intensa de la suspensión	

Figura I.4.11: Métodos de aplicación de fuerzas sobre la suspensión fibrosa

Estos tres métodos de inducción de fuerzas deben ser valorados con el objetivo de conocer su contribución al proceso de desintegración. Los criterios para su valoración son los siguientes:

- La cantidad de fuerza inducida al grumo.



- La frecuencia o intensidad de aplicación en el proceso de individualización.
- El tamaño mínimo de grumo obtenido.

En el año 1998 Bennington desarrolló un modelo matemático de desfibrado suponiendo que la interacción entre fibra y rotor es el principal responsable del desfibrado. El modelo matemático sigue una cinética de primer orden y la progresión en el desfibrado se debe al contacto continuado entre las fibras y el rotor. El grado de desfibrado depende de las fuerzas aplicadas a la suspensión a través del rotor y también de la resistencia del papel a desfibrar. El modelo fue validado utilizando diferentes tamaños de rotor helicoidal y distintos tipos de papeles reciclados.

Posteriormente, se demostró que a partir de la generalización del concepto de viscosidad aparente y la aplicación del análisis dimensional es posible la obtención de un factor de cizalla que englobe la totalidad de las fuerzas implicadas en la desintegración.

4.3.3. Evaluación de la desintegración

Los distintos tipos de material fibroso que se pueden desintegrar necesitan cantidades de energía bastante diferentes para conseguir un nivel de individualización deseado. Por eso la desintegración del material fibroso puede consumir entre un 5 y un 15% de la energía total utilizada en la fabricación del papel.

La energía consumida por el desfibrado depende, sin embargo, de muchos otros factores, como por ejemplo, el tipo de púlper y sus dimensiones, la geometría del rotor, el espacio muerto entre el rotor y la platina de extracción, la platina de extracción (como factor de capacidad en procesos continuos), el tipo de proceso (continuo o discontinuo), la temperatura, la consistencia de desintegración o los reactivos añadidos.

Hay dos criterios de medida para clasificar el material de entrada de acuerdo con su facilidad para ser desintegrado: el consumo específico de energía (SEC) y el índice de Somerville (SV). El ahorro económico en el púlper será función de estos dos parámetros.

El consumo específico de energía (SEC) se puede calcular a partir de la fórmula publicada por Merrett (1987):



$$SEC = \frac{P * t_p}{0,9 * M * 60}$$

Donde tenemos que:

- SEC = Consumo específico de energía (kW·h/t)
- P = Potencia del motor (kW)
- t_p = Tiempo de desintegración (min)
- M = Masa de material fibroso (t)

Por último, el 0.9 es un factor que ajusta el contenido en humedad promedio del material fibroso.

Este consumo específico de energía también puede ser calculado partir de la fórmula propuesta por Savolainen en 1991:

$$SEC = (3) * \frac{1}{2} * V * I * \cos \Phi * n * \frac{t}{m}$$

Donde tenemos que:

- V = Voltaje (V)
- I = Intensidad de corriente (A)
- Φ = Angulo de desfase
- n = Coeficiente de transferencia de energía
- t = Tiempo de desintegración (h)
- m = Masa de material fibroso (t)

El índice de Somerville (SV) proporciona el porcentaje en peso de material no desfibrado en la suspensión desintegrada. Para obtener este valor se utiliza un tamiz con ranuras de 0.15 mm de anchura y 45 mm de longitud, según norma Tappi UM242.

Cuando se evalúa la desintegración de mezclas de papeles, el objetivo es determinar el tiempo necesario y la energía específica consumida para llegar a un nivel de desfibrado valorado según índice Somerville.

4.3.3.1. Requerimientos básicos para una desintegración eficiente y económica

Para una aplicación eficiente y económica del proceso de desintegración o pulpeado hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

La característica principal para determinar el comportamiento de un material fibroso en una etapa de desintegración es su longitud



de rotura en húmedo ya que es la propiedad que mejor se correlaciona con la energía de desintegración (SEC).

Puesto que se produce una pérdida muy grande y muy rápida de resistencia del material fibroso en los primeros instantes de la puesta en suspensión, es importante asegurar que todo el material se moja tan rápido como sea posible para iniciar una desintegración efectiva. El púlper tiene que ser capaz de homogeneizar y efectuar una descomposición preliminar rápida con humidificación completa del material fibroso. Una buena humectabilidad de la carga reduce la fuerza del entramado fibroso y por lo tanto, las fuerzas de tensión que deben transferirse del rotor al papel se reducen. Ahora bien, cantidades grandes de agua o consistencias muy bajas, también reducen la economía de la desintegración porque se pierde efectividad debido a pérdidas hidráulicas importantes.

Para introducir fuerzas elevadas a la pasta en suspensión, debe haber una velocidad diferencial elevada entre el material en suspensión y el rotor. Este requerimiento puede conseguirse con una velocidad de agitación alta, que tiene la desventaja del alto consumo de energía y/o con una circulación lenta de la suspensión. Esta última situación puede conseguirse con una viscosidad elevada de la suspensión, es decir, con consistencias altas o bien con deflectores dentro del púlper. A consistencias altas el diseño del púlper tiene que asegurar la uniformidad del flujo de pasta en el interior del depósito.

Para obtener una intensidad de aplicación elevada de la fuerza de inducción, la longitud del eje del rotor tiene que ser lo más grande posible y la acción que se aplica sobre el material en suspensión, efectiva y uniforme a lo largo de todo este eje.

Los contaminantes son procesados de acuerdo con sus propiedades de resistencia. Aquellos que tengan más resistencia serán parcialmente rotos por efectos de impacto y podrán ser fácilmente eliminados por tamizado.

La desintegración global incluye también los equipos complementarios que generalmente son despastilladores. La transferencia del stock fibroso desde el púlper hasta estos equipos tiene que ser lo más rápida posible, especialmente para aquellos papeles con resistencia elevada.



4.3.4. Tratamiento de los rechazos en púlperes convencionales

La aplicación de los equipos *separador de pesados* y *púlper auxiliar* instalados en paralelo con el púlper principal, conlleva una serie de ventajas, que permiten, de una forma óptima y con un bajo incremento de potencia eléctrica, aumentar la capacidad de producción del púlper principal, en púlperes de baja y media consistencia.

- **Aplicación del separador de pesados:**

Permite desde el principio de funcionamiento, eliminar las impurezas pesadas (piedras, alambres, grapas, etc.) contenidas en la materia prima empleada (papelote), ofreciendo una seguridad extra, para los equipos de depuración posterior, reduciendo los desgastes, mantenimiento y daños.

- **Aplicación del púlper auxiliar:**

El púlper auxiliar trabaja en paralelo con el púlper principal, al disponer de un rodete enérgico con cuchillas y una chapa perforada, con el mismo diámetro de agujeros que el púlper principal, la pasta aceptada está en las mismas condiciones que la que acepta el púlper principal. Esta pasta aceptada por el púlper auxiliar, al no ser recirculada al púlper principal, se incorpora a la aspiración de la bomba de vaciado del púlper principal, y nos aumenta la capacidad de producción, automáticamente.

El funcionamiento del púlper auxiliar no necesita bomba ya que el rodete tiene un diseño que bombea los rechazos hasta el Trommel para ser lavados y posteriormente retirados.

El separador de pesados funciona en continuo retirando las impurezas pesadas y va realizando los ciclos de limpieza mediante su saco dinámico de forma que no interfiere en la salida de pasta del púlper principal. Las impurezas se depositan en un cesto perforado para su drenaje y extracción final.

El tratamiento de los rechazos impulsados por el púlper auxiliar a través del Trommel para ser retirados posteriormente.

El púlper auxiliar recibe la pasta directamente de la cuba del púlper principal por encima de la chapa perforada y a través del separador de pesados realizando la función de púlper secundario, una vez la pasta es recibida por el rotor del púlper secundario empieza a pasar a través



de la chapa perforada como aceptado y se incorpora a la aspiración de la bomba de vaciado del púlper principal.

Los contaminantes se acumulan en el interior de la cuba y según la cantidad se procede a un ciclo de lavado por un sistema electro-neumático totalmente programable.

El tiempo de trabajo del púlper auxiliar se determina según el contenido de contaminante que contiene la materia prima utilizada (papelote).

Cuando se realiza el tiempo de lavado el púlper auxiliar no recibe pasta del púlper principal anulando su paso por medio de las válvulas instaladas en el circuito.

El rodete del púlper auxiliar impulsa los rechazos al Trommel para ser lavados y extraídos por medio de un espiral del interior del Trommel para ser retirados posteriormente.

El equipo funciona en discontinuo y en automático mediante las válvulas suministradas y nos permite realizar ciclos combinados de limpieza facilitando de esta forma el trabajo de los operarios sin tener necesidad de intervenir manualmente para la retirada de los contaminantes.

Este sistema se aplica a los púlperes que trabajan en continuo con papeles recuperados aumentando su eficacia en un 15 a un 20 % y reduciendo los tiempos de parada al mínimo de veces según tipo de papelotes empleados y trabajar con consistencias más constantes para la eficacia de la producción.

En resumen, el sistema implantado en varias compañías papeleras da muy buen resultado principalmente porque a diferencia de otros sistemas no se recircula la pasta al púlper principal y los equipos disponen de ciclos de lavados automáticos, aumentando notablemente la eficacia en la producción y resultado final del proceso.

4.3.5. Despastillado

La operación de despastillado tiene como objetivo la separación de las fibras restantes en los grumos o haces fibrosos que no han sido desintegrados durante el proceso de pulpeado. Estos grumos y pastillas pueden proceder de calidades estucadas, de aplicación de



tratamientos superficiales o contenidos elevados de resinas de resistencia en húmedo. Para desestructurar completamente estos grumos, es necesaria la etapa de despastillado.

Aunque los despastilladores son los equipos utilizados con este objetivo, los depuradores de disco o los púlperes secundarios ejercen un efecto de despastillado más suave.

En una operación de despastillado, las consistencias de trabajo están alrededor del 3%–6%. La operación de despastillado también mejora la separación de las tintas de impresión y reduce el tamaño de los pegotes y grumos que deben ser eliminadas a posteriori en procesos de destintado. Cuando se tratan papeles recuperados difíciles de desintegrar, la desintegración seguida de un despastillado es la combinación más económica desde el punto de vista energético.

La eficiencia del despastillado depende enormemente de los contaminantes que contiene la pasta procedente del papel recuperado. El principio de funcionamiento de un despastillador es parecido al de un desintegrador o púlper. Actúan las mismas fuerzas de aceleración, viscosidad, impacto o su combinación, siendo más importantes y con más probabilidad en los despastilladores que en los púlperes. La aplicación de temperatura o el uso de reactivos químicos mejoran el proceso de despastillado.

Los depuradores de disco o púlperes secundarios son parecidos a los púlperes normales, no sólo por su forma sino también por sus características de flujo. Los filtros de disco tienen agujeros más finos y la intensidad de energía aplicada es alta, dándose en ellos un despastillado más efectivo que en los púlperes secundarios. Se utilizan principalmente para el tamizaje grueso de las suspensiones que contienen una gran cantidad de grumos o pastillas. A bajas consistencias pueden presentar agujeros más gruesos con un tratamiento de rechazos posterior. A consistencias altas, el depurador permite tratar los rechazos fuera del púlper evitando, de esta forma, su colapso. La principal ventaja de los depuradores de disco es que lo separan todo. Como contrapartida, tienen una gran limitación en el efecto despastillador. Los depuradores de disco se utilizan para tratar mezclas de papel recuperado destinadas a la producción de papel y cartón para embalajes.



4.3.6. Tamizado y depuración

El tamizado y depuración son operaciones de separación mediante el uso de tamices o barreras cuyo objetivo principal es la eliminación de los contaminantes sólidos de la pasta reciclada. Gracias al tamizado se llegan a conseguir los requerimientos de limpieza de las pastas recicladas, eliminando desde películas plásticas hasta pequeñas partículas y stickies que están por debajo del límite visible. La suspensión fibrosa se tamiza a través de agujeros o ranuras más pequeños que la mayoría de las partículas que tienen que ser separadas, pero más grandes que las fibras.

En la tecnología del tamizado se han conseguido avances importantes, especialmente cuando hablamos del tamizado con ranuras. En función del tipo de pasta, se pueden utilizar ranuras por debajo de 0.10 o 0.15mm. Aun así, el ancho de la ranura no es el único criterio de separación, pues la hidrodinámica del proceso tiene una gran importancia.

Tanto las configuraciones de los tamices como los sistemas de tamizado se tienen que adecuar al grosor de partícula, forma y deformabilidad de los contaminantes. A veces también se hace necesaria la separación de las fibras en función de su longitud o flexibilidad. Este tipo de separación se lleva a cabo mediante el fraccionamiento que utiliza los mismos equipos que el tamizado.

En sus inicios, los equipos que se utilizaban para el tamizado eran tamices vibratorios abiertos. Hoy en día los tamices son cerrados y presurizados para incrementar su capacidad, excepto algunos tamices de colado de tamizado grosero.

No es posible conseguir un tamizado completo de la suspensión de fibras recicladas en una sola etapa. En función de la composición de la suspensión fibrosa harán falta diferentes equipos y diferentes diseños de línea.

Lo que hay que conseguir en cualquier sistema de reciclado/destintado es eliminar las partículas más grandes tan pronto como sea posible, evitando al mismo tiempo que se rompan excesivamente los contaminantes. Un tamizado adecuado mejora la eficacia de las etapas que lo siguen.

Evitar por completo la pérdida de fibras en los procesos de tamizaje no es posible, estas pérdidas se pueden reducir significativamente pasando los desechos de un proceso de tamizado hacia una segunda,

tercera o hasta una cuarta etapa de tamizado. La última etapa (tailing screen o tamiz de cola) determina la pérdida total de fibras del sistema.

La eficacia de limpieza de un sistema de tamizado incrementa con el flujo de desecho. Cuanto más desecho más eficacia, pero al mismo tiempo, más fibras se pierden. El objetivo es llegar a un punto óptimo entre la eficacia de limpieza que se quiere, la pérdida de fibras, los costes de inversión, la selección de tamices y el número de etapas.

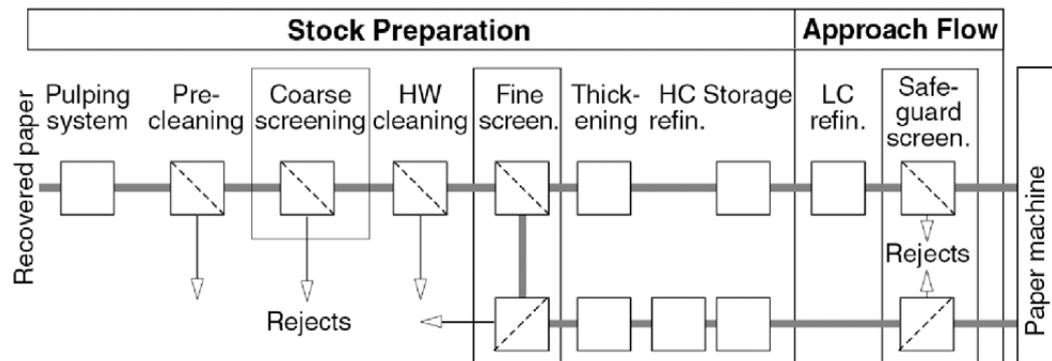


Figura I.4.12: Etapas de tamizado en la preparación de pasta para fabricar test liner a partir de la mezcla de papel recuperado.

En la figura I.4.12 se muestra la integración de diferentes etapas de tamizado en un sistema de preparación de pastas para utilizar en la fabricación de test liner a partir de mezclas de papel recuperado. En la parte de preparación de la suspensión podemos ver un tamizado grosero (coarse screening) en el rango de trabajo de media consistencia (MC) llevado a cabo mediante un tamiz de disco con agujeros y un tamizado fino (fine screening) en el rango de trabajo de baja consistencia (LC) usando un tamiz cilíndrico con ranuras.

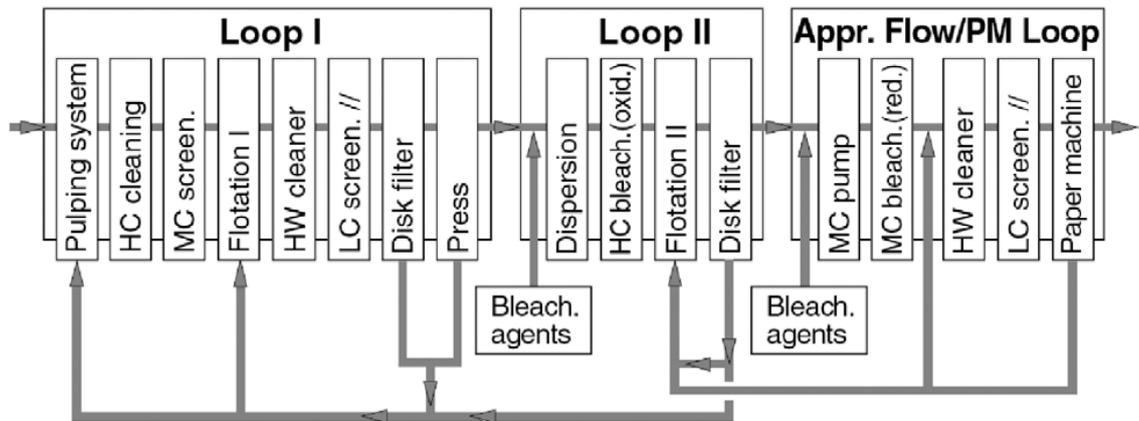


Figura I.4.13: Integración del tamizado en un sistema de preparación de pastas destinadas para papel de periódico utilizando como materia primera periódicos (ONP) y revistas viejas (OMG).

En la figura I.4.14 se muestra un sistema de preparación de pasta para destintado y hacer papel prensa utilizando periódicos y revistas viejas con un tamiz cilíndrico de agujeros a MC (3–4%) y otro tamiz cilíndrico de ranuras a LC (aproximadamente 1%), ambos en el primer ciclo del proceso.

4.3.6.1. Equipos para el tamizado

Se pueden utilizar distintos tamices en distintas partes de un proceso de reciclado/destintado de papel recuperado en función de la materia prima, del producto final, del desecho que hay que eliminar, del contenido en grumos o de la consistencia de trabajo.

Todos los tamices tienen en común un cuerpo con conexiones para la entrada, aceptados, desechos y a veces también para desechos ligeros, con un rotor con palas de limpieza y un tamiz. El cuerpo puede estar presurizado o trabajar a presión atmosférica. Los tamices pueden ser planos (tamices de disco) o cilíndricos (tamices cilíndricos). Las perforaciones tipo agujero normalmente están entre 0.8 - 1.5 mm de diámetro para los tamices cilíndricos y de 2.0 - 3.0 mm de diámetro para los tamices planos. Los tamices con ranuras generalmente son cilíndricos y el ancho de la ranura suele ser superior a los 0.1 - 0.4mm.

4.3.6.2. Tamizado grosero

Para el tamizado grosero que se lleva a cabo después del pulpeado, se pueden utilizar tanto los tamices de disco como los cilíndricos. Ambos trabajan bajo presión. Los tamices de disco o púlperes secundarios se utilizan para mezclas de pasta con contenidos elevados de contaminantes además de grumos y pastillas. Se utilizan estos tipos de tamices porque son más insensibles a los contenidos elevados de contaminantes y además, ofrecen una buena eficacia de despastillado. Para suspensiones fibrosas más limpias y demandas de más calidad, el uso de los tamices cilíndricos es más adecuado.

El tamizado grosero aprovecha el potencial desintegrador de los tamices de disco. Con ello se minimiza la pérdida de fibras y se asegura una estabilidad operacional en tamizados posteriores.

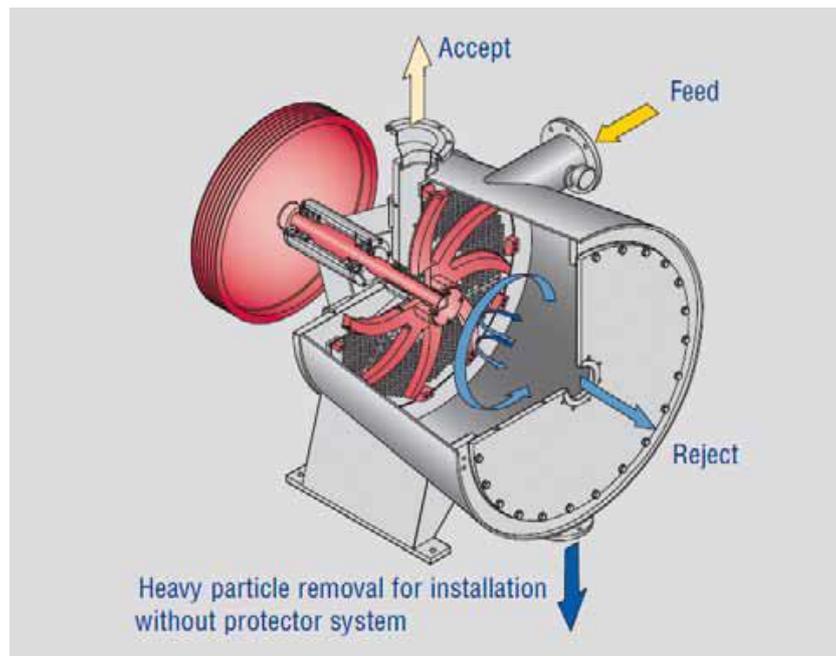


Figura I.4.14: Diagrama de un tamiz de disco Fibersorter™ con rotor de palas y tamiz plano.

En la Figura I.4.14 se muestra el diagrama de un tamiz de discos comercial (Fibersorter™). El rotor gira a unas velocidades periféricas entre 20 y 30 m/s, y dispone de una serie de palas curvadas que transportan los contaminantes y los grumos hacia el exterior. El espacio entre el rotor y el tamiz es de unos 2 - 4mm.

generalmente encontramos dos tipos de rotores, con o sin deflectores.



Figura I.4.16: Rotores para tamizado grosero

El tipo de rotor “lobed” utilizado para el tamizado grosero con aberturas de agujero trabaja con elevadas eficiencias. El tipo de rotor “step” es muy versátil y se puede utilizar tanto para tamices de agujero como de ranura. La acción suave del rotor tipo “bump” se utiliza con tamices de ranura y aporta una eficacia de limpieza alta pero también con una elevada fragmentación.

La etapa final de un sistema de tamizado grosero, conocida con el nombre general de tamiz de cola, trabaja normalmente con ratios de eliminación bajos sobre los desechos de tamizado que llegan y que presentan muchas partículas contaminantes, así como también fibras largas. Los tamices de etapa final con diseño abierto suelen ir equipados con tamices planos perforados.

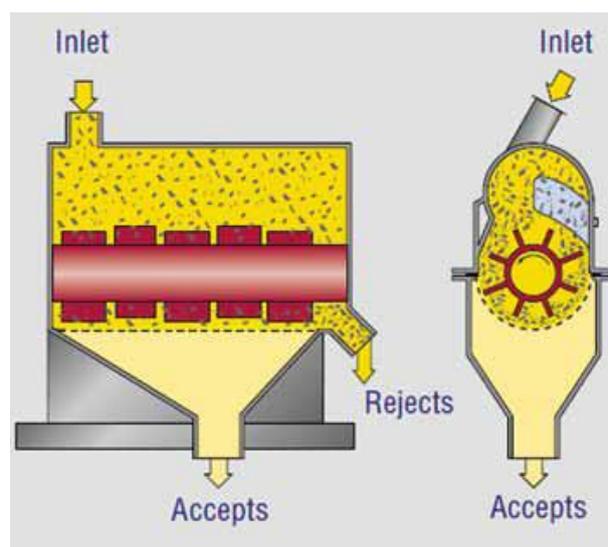


Figura I.4.17: Esquema de funcionamiento de un tamiz de cola Rejectsorter™.



En la anterior figura se muestra el esquema y la fotografía de un tamiz de etapa final usado especialmente para mezclas de papeles marrones. Se trata de un tamiz abierto (no trabaja bajo presión), con un rotor con deflectores que continuamente fuerzan la suspensión contra el tamiz, eliminando el material retenido y devuelven la suspensión fibrosa al tamiz. Los aceptados van saliendo mientras el material retenido se diluye con agua. El desecho sale de forma continua concentrado al 20–30% de consistencia.

4.3.6.3. *Tamizado fino*

El tamizado fino se lleva a cabo generalmente dentro del rango de baja consistencia, aunque a veces también se da a media consistencia. Los equipos más utilizados para llevarlo a cabo suelen ser los tamices de cesta presurizados. La precisión de estas cestas respecto al ancho de ranura y al perfil de ángulo tiene que ser muy alta. Los resultados dependen enormemente de la geometría exacta de estos parámetros. Así, las partículas que son muy abrasivas tienen que ser eliminadas de la suspensión antes de estos tamizados finos. Esta eliminación se llevará a cabo en los hidrociclones que trabajan a baja consistencia. Esta es la razón por lo cual el tamizado fino siempre está situado detrás de una etapa de depuración a baja consistencia (LC).

Por ejemplo, para llevar a cabo un tamizado fino de fibra reciclada procedente de papeles de impresión y escritura, las cestas con ranuras de ancho superior a 0.1 mm son muy útiles. Para los stocks marrones, los anchos de ranura de la cesta suelen ser superiores a los 0.15mm.

A principios de los años 90 se desarrolló la técnica wedge wire para la construcción de las cestas de ranura curvadas, en la siguiente figura se presenta un esquema del tipo de cesta de estos tamices.

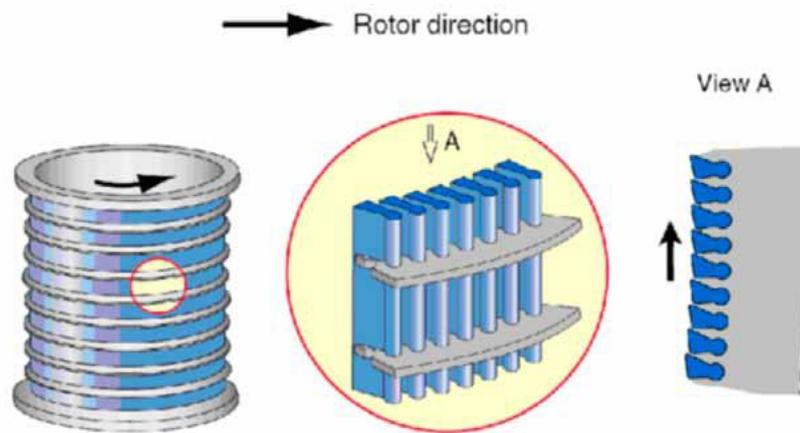


Figura I.4.18: Esquema de un tamiz de cesta con barras con un detalle del perfil de superficie

El espacio entre las barras se corresponde con el ancho de las ranuras que debe ser muy precisa en toda la superficie de la cesta de tamizado. Con técnicas de fabricación eficientes para estos tipos de tamices se pueden conseguir tolerancias de $\pm 0.01\text{mm}$. Esta construcción de barras con forma de cuña permite ranurar a todo lo largo de la cesta y ofrece un área de apertura máxima para un ancho determinado. También permite diferentes perfiles superficiales y diseños de secciones abiertas, modificando en definitiva las condiciones de flujo dentro del área de trabajo. Para el tamizado fino dentro del rango de media consistencia (MC), se utilizan rotores tipo bump y tipo foil como el que podemos ver en la siguiente figura:



Figura I.4.19: Rotor tipo foil usado para el tamizado fino.

Cuando se trabaja dentro del rango de baja consistencia generalmente se usan los rotores tipo foil. En los sistemas de tamizado fino también existe la etapa final del proceso, como ocurría con el tamizado grosero. Por razones de calidad, sólo los tamices con ranuras se usan en las etapas finales de los sistemas de tamizado fino. Ello es debido a las altas demandas de eficacia de este estadio. En este punto hay que adoptar un compromiso entre la calidad de un tamizado efectivo y la eficacia de recuperación de fibras.

4.3.6.4. Mecanismos de tamizado

El tamizado engloba diferentes mecanismos de separación de partículas en la superficie de un tamiz plano y el paso de estas partículas a través de las aperturas del tamiz. La probabilidad del proceso de tamizado está dominada por fenómenos hidrodinámicos de separación muy complejos en los que no nos centraremos. El rotor nos asegura el transporte de las partículas hacia los distintos flujos, así como la generación de pulsos de presión que controlan la variación de la velocidad en la superficie de las ranuras y ayudan a remover los contaminantes de la superficie de los tamices.

Las partículas son eliminadas en el tamiz en función de su grosor, forma y deformabilidad. Las partículas no deformables y con dimensiones superiores a las aperturas del tamiz son retenidas. Es cuestión de probabilidad que las partículas con dimensiones una, dos o tres veces inferiores a la apertura del tamiz sean eliminadas.

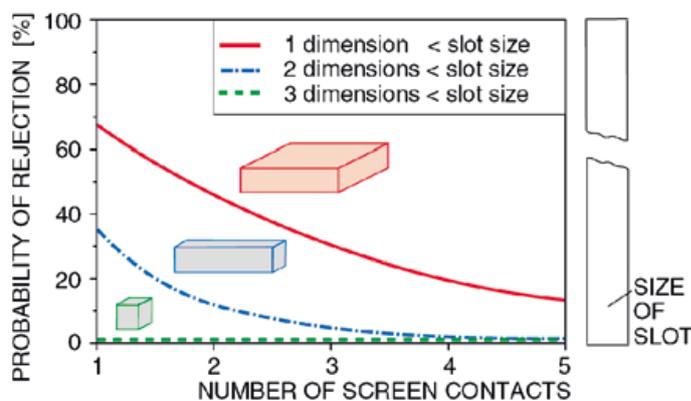


Figura I.4.20: Probabilidad de eliminación de partículas en función de su grosor y de la frecuencia de contactos.



Como se ve en la figura I.4.20, la probabilidad de eliminar partículas es mayor con un mínimo número de contactos entre la superficie del tamiz y la partícula. Para evitar que una partícula retenida vuelva a contactar con el tamiz hace falta su separación lo más rápida posible. Esto significa tener un flujo de desechos muy alto. También se hace necesaria una buena mezcla en la parte interior del tamiz para evitar que las partículas se concentren cerca de éste. El inconveniente de esta buena mezcla es que se incrementa la cantidad de fibras eliminadas.

4.3.7. Fraccionamiento

El objetivo de esta operación es separar las fibras en función de su longitud o flexibilidad, se lleva a cabo en tamices de disco o tamices cilíndricos. Los equipos que se usan son los mismos que para el tamizado, diferenciándose únicamente en sus condiciones de trabajo. Con los tamices de disco y cilíndricos, los agujeros suelen ser más pequeños en el fraccionamiento que en el tamizado. Las cestas con ranuras tienen aberturas mucho más estrechas o bien presentan diferentes perfiles.

De un modo general para el tamizado la división del flujo en el desecho está comprendida entre el 5 y el 25%, mientras que en el fraccionamiento está comprendida entre el 30 y el 40%. Nos referimos a la fracción de desecho como la que contiene las fibras más largas, debido a que en el fraccionamiento no hay desechos como tal.

El objetivo de esta separación de las fibras (cortas y largas), es para tratarlas posteriormente por separado. Dependiendo de los requerimientos que se necesiten después del fraccionamiento.

Normalmente el fraccionamiento se realiza para refinar de forma independiente, para eliminar contaminantes más abundantes en la fracción de fibra larga, o para someter la fibra corta y la larga al proceso de eliminación de tinta por flotación por separado, de manera que se produzca un ahorro energético y una reducción de pérdidas de fibra.

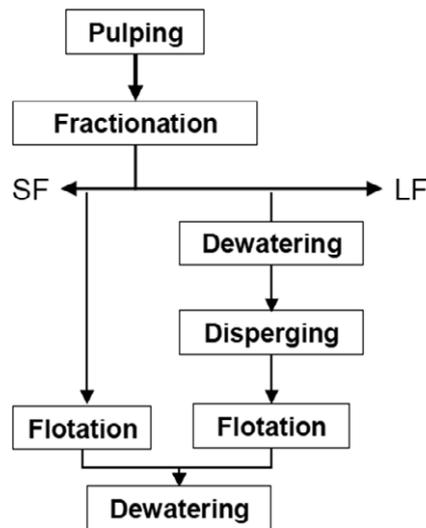


Figura I.4.21: Sistema simplificado de una línea de destintado.

4.3.8. Depuración centrífuga

El principal objetivo de la depuración centrífuga es la eliminación de las partículas de la suspensión que afectan a la calidad del papel o que pueden provocar un desgaste excesivo en los equipos del proceso. Estos contaminantes que se eliminan pueden ser pesados como

arena, piezas metálicas y fajos fibrosos o ligeros como espumas plásticas o material plástico en sí. Para una eliminación eficiente, estas partículas tienen que cumplir dos condiciones:

- Tener una densidad que difiera bastante de la del agua
- Tener distinta forma y grosor respecto a los demás componentes de la suspensión.

Los procesos de depuración centrífuga usan hidrociclones por ello esta etapa también es conocida como depuración ciclónica. Estos depuradores centrífugos o hidrociclones tienen un diámetro de cabeza entre 60 y 500 mm y una capacidad entre 5 y 500 m³/h.

Los hidrociclones más grandes (diámetro de cabeza > 200 mm) suelen ser depuradores de alta densidad (HD) usados para la depuración grosera, mientras que los depuradores más pequeños (diámetro de cabeza < 100 mm) se utilizan en rangos de baja consistencia y para depuraciones más finas.



El campo centrífugo generado en los hidrociclones fuerza a las partículas pesadas hacia fuera mientras que las partículas ligeras se mueven por el centro. Las corrientes que contienen estas partículas más pesadas se separarán del flujo principal y se convertirán en los aceptados o bien el desecho, en función de si la depuración es grosera o fina.

La utilización de estos hidrociclones en los procesos de obtención de fibras recicladas presenta algunas diferencias respecto a su utilización con fibras vírgenes. Usando fibras recicladas hay presentes muchas más partículas para separar, además su tipología y composición es mucho más variada.

La depuración centrífuga nos puede eliminar estos tipos de partículas de la suspensión de fibras recicladas siempre que cumplan unas características diferenciales determinadas:

- Densidad o gravedad específica superior a la del agua (metal, cristal y arena) o inferior (plásticos) para permitir la separación centrífuga. Algunos stickies no se pueden separar por depuración centrífuga porque presentan densidades muy similares a la del agua.
- Grosor dentro del rango de los diámetros de perforación de los tamices, entre 8 y 20 mm hasta por debajo de 5 mm, como por ejemplo las cargas. Los depuradores centrífugos pueden eliminar partículas más pequeñas que mediante el tamizado.
- Deformabilidad, como por ejemplo la de los stickies que permita el paso a través de las aberturas de los tamices. Los hidrociclones pueden eliminar estas partículas siempre y cuando su densidad sea suficientemente diferente y tengan grosores importantes.

La depuración centrífuga es esencialmente un proceso de separación que complementa otros procesos como por ejemplo el tamizado.

Los hidrociclones sólo pueden trabajar de forma efectiva si el diseño y las condiciones de trabajo están de acuerdo con unos requerimientos específicos. Por eso, en un sistema de procesado de fibras recicladas nos podemos encontrar con diferentes diseños de depuradores.

4.3.8.1. Mecanismos en la depuración

En un hidrociclón, el flujo rotatorio que se necesita para crear un campo centrífugo se genera dirigiendo la suspensión tangencialmente a través de una entrada apropiada. La geometría de entrada convierte la energía de bombeo en un flujo rotatorio. El



rozamiento sobre las paredes del ciclón desacelera la suspensión. Para mantener una aceleración centrífuga correcta, el radio del ciclón se va reduciendo hacia la parte inferior. Así, la mayoría de hidrociclones tienen una sección de entrada en la parte superior de tipo cilíndrico y una sección inferior cónica. Las partículas más pesadas al chocar con las paredes pierden gran parte de su energía cinética y al frenar, son separadas y eliminadas por la parte inferior o bien superior del ciclón.

Conseguir una eficacia de separación, o sea, una depuración elevada, es posible si se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Mantener un diferencial de presión elevado entre la entrada y los aceptados lo que permite una velocidad tangencial y una aceleración centrífuga más altas. Puesto que la pérdida de presión afecta directamente a las necesidades energéticas del ciclón, las razones económicas limitarán esta pérdida de carga.
- Diámetros de ciclón pequeños, lo que comporta limitaciones prácticas ya que es necesario evitar el colapso en las conexiones de entrada y salida. El mínimo diámetro posible dependerá de las dimensiones de las partículas.
- Bajas consistencias puesto que consistencias más elevadas provocan que la red fibrosa sea más densa y se restringe el movimiento de las partículas.
- Bajos contenidos en grumos, con efecto similar a trabajar a consistencias elevadas.
- Temperaturas de trabajo altas, para reducir la viscosidad del agua y por lo tanto, reducir la resistencia del flujo al movimiento radial.
- Carga hidráulica apropiada y separación de los flujos de aceptados y desecho adecuados. Un flujo de desecho muy alto mejora la separación, pero incrementa las pérdidas fibrosas.
- Una eliminación de desechos adecuada.

Los hidrociclones pueden operar a contracorriente o unidireccionalmente, en función de las direcciones de los flujos de desecho y de los aceptados respecto al flujo de entrada. Los ciclones que trabajan en contracorriente presentan flujos de aceptados y de desecho a los lados opuestos del hidrociclón.

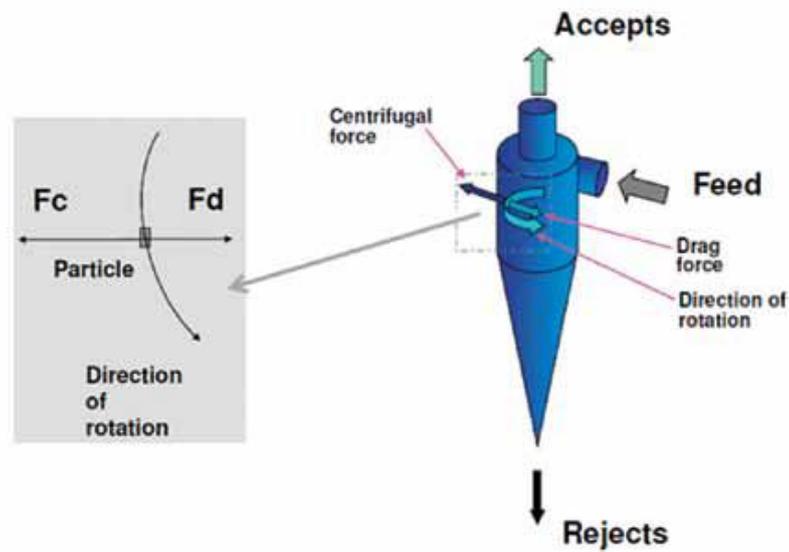


Figura I.4.22: Diagrama de un hidrociclón trabajando a contracorriente para la eliminación de contaminantes pesados.

La configuración final depende de si se separan partículas ligeras (LW) o pesadas (HW). Los hidrociclones que trabajan unidireccionalmente, presentan flujos de aceptados y de desechos en el mismo lado que siempre será el lado opuesto al de la entrada.

En los depuradores unidireccionales cuando se trabaja con partículas pesadas (HW), los desechos se recogen en el mismo lado de la pared del depurador, aprovechando el principio de fuerza centrífuga de estas partículas pesadas. Para los depuradores de partículas ligeras (LW) son los aceptados los que se recogen en el lado de la pared.

En función del rango de consistencias de trabajo, los depuradores también se clasifican como depuradores de alta consistencia (HC), también conocidos con el nombre de depuradores de alta densidad (HD); media consistencia (MC) y baja consistencia (LC).

Los depuradores ciclónicos a alta densidad o alta consistencia son utilizados principalmente para la depuración grosera. Normalmente se sitúan después del pulpeado del papel reciclado, con el objetivo de eliminar los contaminantes pesados tales como la arena, el metal o las partículas de cristal actuando de protección de la depuración por tamizado o despastillado que se lleva a cabo posteriormente. Estas partículas pesadas desgastan mucho los equipos y por lo tanto es importante protegerlos adecuadamente.

La eficacia de estos depuradores está limitada a las partículas grandes y depende de los parámetros de diseño (diámetro de cabeza), consistencias (entre 3.5 y 5.5%), pérdida de presión (50 a 250 kPa) y condiciones de descarga de los desechos.

En una instalación de hidrociclones suele haber dos tipos de configuraciones en los procesos de reciclado/destintado de papel recuperado:

- En batería, configuración en la que se conectan en paralelo los depuradores individuales.

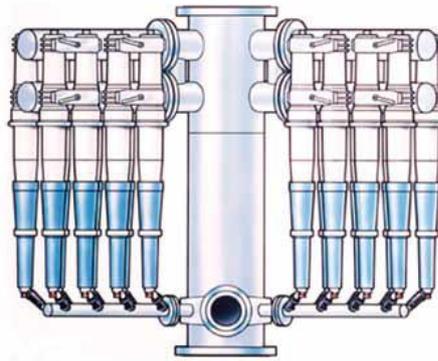


Figura I.4.23: Esquema de una batería de hidrociclones

- En canasta, configuración en la cual los hidrociclones pequeños están incluidos dentro de una estructura de acero inoxidable. Generalmente se utilizan para trabajar a baja consistencia y con eficiencias elevadas.



Figura I.4.24: Esquema de una canasta de hidrociclones

Normalmente las instalaciones de hidrociclones cuentan con sistemas en cascada de 3 ó 4 etapas, para utilizar el mínimo espacio posible y poder recuperar el máximo de fibras celulósicas.

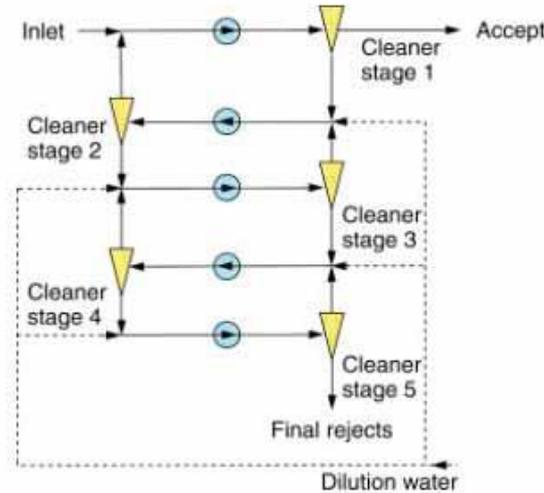


Figura I.4.25: Sistema de hidrociclones en cascada

4.3.9. Dispersión y trituración

El proceso de dispersión y/o trituración forma parte actualmente de cualquier proceso moderno de producción de pasta reciclada y destintada. Durante el reciclado de calidades marrones, la dispersión a temperatura elevada se utiliza para dispersar los contaminantes termofusibles con el fin de evitar problemas de pegotes. En las plantas de producción de pasta destintada (DIP) la dispersión homogeneiza el stock, dispersa las partículas de tinta residual para hacerlas invisibles al ojo humano y además, permite aplicar una etapa de blanqueo.

Los objetivos principales de un sistema de dispersión y trituración dentro de un proceso de obtención de pastas recicladas y/o destintadas son los siguientes:

- Reducir los specks y stickies por debajo del límite visible distribuyéndolos finamente o convirtiéndolos en flotables.
- Romper las partículas de estucado o aquellas procedentes de tratamientos superficiales.



- Separar las partículas de tinta de las fibras recicladas antes del proceso de destintado o reducir su tamaño si ya han pasado por etapas de eliminación de tinta.
- Mezclar los agentes de blanqueo.
- Tratar las fibras mecánicamente para conservar o mejorar sus propiedades de resistencia.
- Tratar las fibras térmicamente para incrementar la densidad específica.
- Asegurar la descontaminación por microorganismos.

La dispersión no elimina contaminantes, pero los reduce a medidas cuyo efecto no es detectable o bien los separa de las fibras para eliminarlos en procesos posteriores. La dispersión implica la aplicación de fuerzas de cizalla muy altas sobre las partículas contaminantes para ser dispersadas. Para transferir esta cantidad de energía de dispersión, la consistencia de trabajo tiene que ser alta, entre el 22 y el 30%.

La etapa de dispersión, por lo tanto, tiene que localizarse en aquellos puntos en los que haya un loop de separación de agua puesto que es ahí donde la pasta se espesa a altas consistencias. Trabajar a altas consistencias también favorece el blanqueo, sobretodo el blanqueo oxidativo. Así, se pueden aprovechar los dispersores para hacer la función de mezcladores de los agentes de blanqueo. Si las demandas de propiedades sobre el stock final son muy elevadas, la dispersión se puede dar en dos puntos del sistema, muchas veces, usando los mismos equipos.

La energía que hace falta aplicar en los procesos de dispersión/trituración depende de la viscosidad de la suspensión, de la temperatura, del tipo de relleno y de la velocidad periférica de los equipos. Los procesos posteriores a la dispersión dependerán de la consistencia y condiciones de presión e incluyen muchas veces etapas de blanqueo a media y alta consistencia o bien diluciones al 5%.

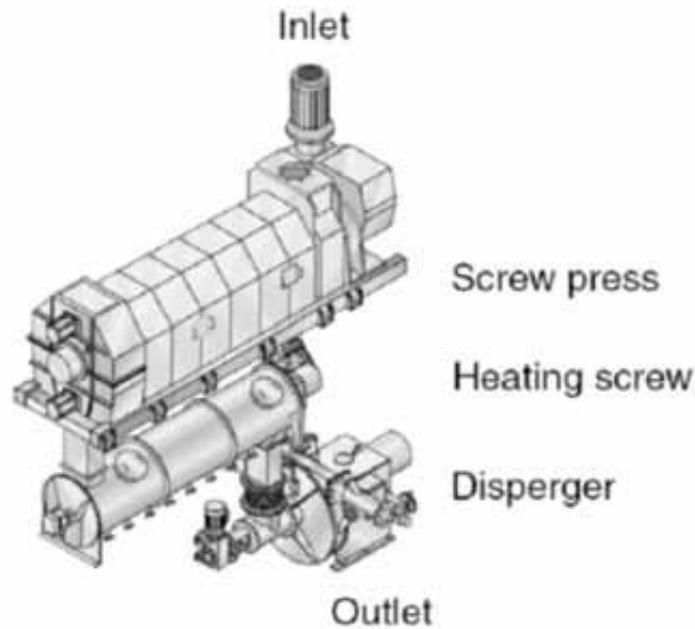


Figura I.4.26: Sistema de dispersión completo con una prensa de tornillo para el espesamiento, el elemento calefactor y el dispersor.

4.4. Proceso de destintado

Un proceso de destintado es una extensión del proceso de reciclado, imprescindible en la fabricación de papeles de alta calidad. Todos aquellos componentes que pueden provocar una reducción del grado de blancura, principalmente las tintas, deben ser eliminados, pero además, deben ser eliminados los aditivos utilizados durante la impresión, conversión y uso final del papel. Desde un punto de vista de reciclaje, todos estos aditivos son contaminantes.

Las exigencias del mercado actual sobre las pastas recicladas y destintadas (conocidas como pastas DIP) para ser incorporadas en los procesos de fabricación de papeles para impresión y escritura son comparables a las demandadas en pastas vírgenes.

Para conseguir estos requerimientos tan estrictos hacen falta sistemas de tratamiento de los papeles recuperados complejos y que sean muy eficientes respecto a la eliminación de contaminantes que pueden estar dentro de rangos de magnitudes muy distintas, como vemos en la siguiente figura:

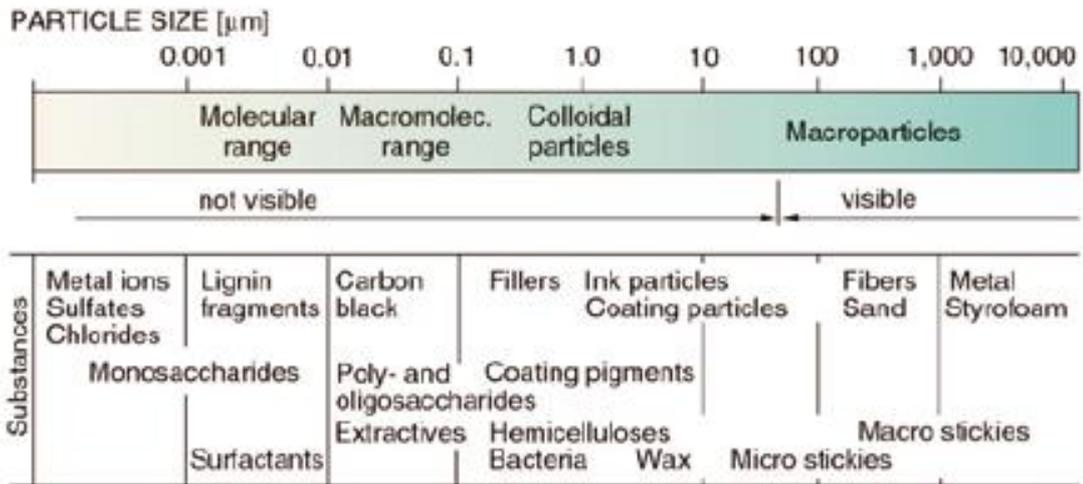


Figura I.4.27: Distribución del tamaño de las posibles partículas en el proceso de destintado.

Los sistemas de reciclado y destintado a nivel industrial combinan de forma optimizada todas las operaciones de eliminación de contaminantes (tamizado, depuración, flotación, lavado etc), basándose en propiedades que los diferencian de las fibras, finos y cargas.

Un sistema de tratamiento puede incorporar una misma operación de separación en diferentes puntos para aprovechar al máximo su efectividad de separación.

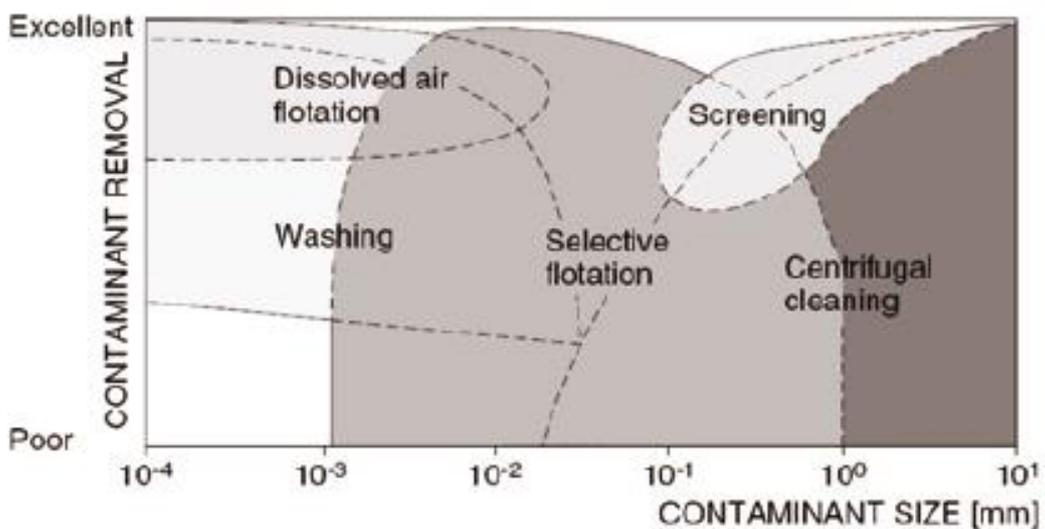


Figura I.4.28: Eficiencia de diferentes operaciones de separación en función de los tamaños de partícula



En la figura I.4.28 observamos, por ejemplo, que la eficiencia de los depuradores es excelente si el diámetro de partícula es grande y su densidad bastante diferente a la del agua y de las fibras celulósicas en suspensión. En diferentes condiciones, la efectividad de la separación puede ir bajando hasta ser nula.

Los contaminantes más pequeños que las fibras se pueden eliminar por **lavado**, mientras que los contaminantes mayores que las fibras, siempre que sean lo bastante rígidos, se pueden eliminar por **tamizado**.

Los contaminantes muy pesados o muy ligeros (gran diferencia de densidad respecto al agua) pueden ser eliminados por **depuración**.

También se aprovechan las diferencias en las propiedades superficiales, la flotación permite eliminar las partículas hidrofóbicas.

En un proceso de destintado, lo primero que se debe llevar a cabo es la separación de la tinta de las fibras, lo cual se consigue mediante la desintegración. Como hemos visto, existen diferentes etapas de eliminación de contaminantes desde los más groseros hasta los de tamaño microscópico. La eliminación de tinta propiamente se realiza tanto a través de la flotación como del lavado, que permitirán separar la tinta de las fibras, y veremos más detalladamente en los siguientes puntos.

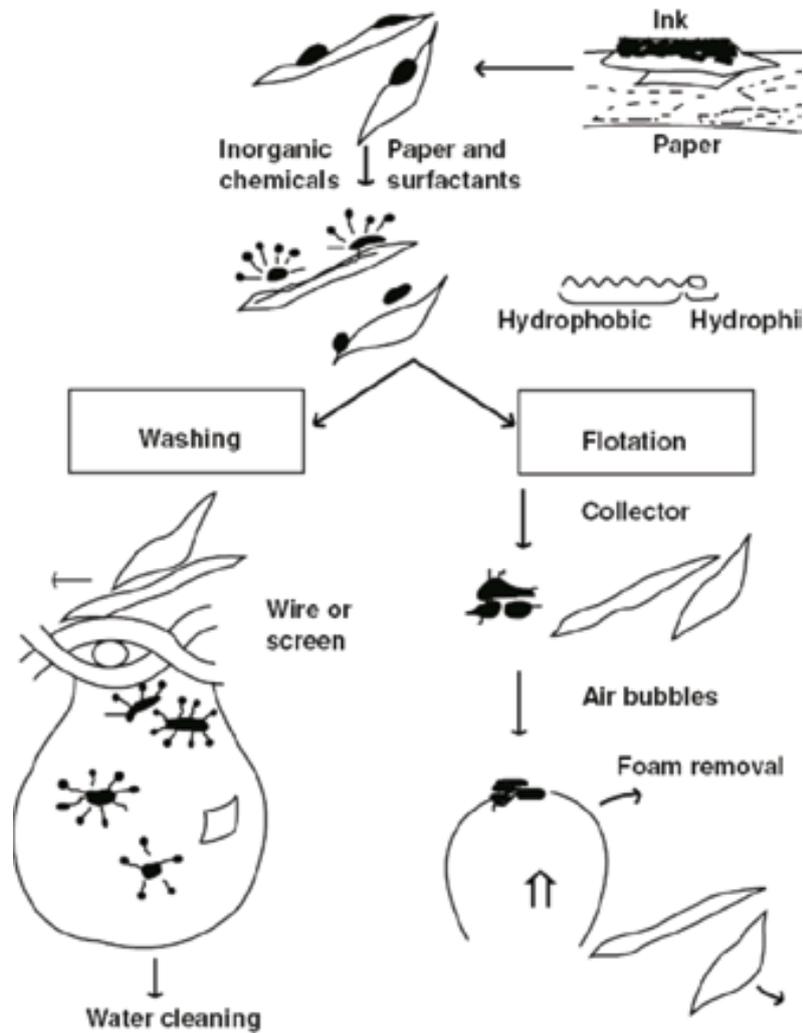


Figura I.4.29: Esquema del proceso de destintado por flotación y por lavado

4.4.1. Flotación

Esta técnica se ha empezado a utilizar para la eliminación de tinta residual hace 4 décadas, anteriormente se utilizaba en la minería para concentrar los minerales que se iban extrayendo de las minas, muchos de los estudios y teorías que se desarrollaron para la flotación en minería son aplicables en nuestro proceso, teniendo en cuenta algunas diferencias fundamentales. Estas diferencias se resumen en la tabla I.4.2:

Tabla I.4.2: Diferencias entre el destintado en minería y en la industria papelera

Parámetro	Destintado por flotación	Flotación de Minerales
Energía superficial de las partículas	Complejo por contener: Partículas con baja energía superficial y carácter hidrófobo (adhesivos). Partículas con energía superficial mediana (tintas hidrófobas). Partículas con energía superficial alta (cargas y fibras).	Acostumbran a ser partículas con una elevada energía superficial y carácter hidrofílico
Tamaño de las partículas	Amplia distribución de tamaños	Amplia distribución de tamaños
Densidad de las partículas	Muy baja, a menudo inferior al agua	A menudo superior al agua
“Liberación” de las partículas del soporte	Mediante una desintegración y en presencia de reactivos químicos	Mediante molturación sin la presencia de reactivos químicos
Propiedades de la suspensión	Muy heterogénea Temperaturas altas (40-60 °C) Posible redeposición de partículas Presencia de una red fibrosa que tiende a formar flóculos cuando se trabaja a consistencias >1%.	Homogénea Bajas temperaturas La redeposición no es importante
Caracterización final del producto	Mediante: - Blancura de la hoja final. - Análisis de imagen - Contenido en stickies.	Mediante análisis químicos
Impacto de la eficacia del proceso en el resto de etapas	Disminución de la calidad del producto y problemas de maquinabilidad	La pureza del producto final se ve afectada

La flotación es un proceso de separación en el que un conjunto de burbujas se introduce en el seno de un tanque agitado que contiene la suspensión fibrosa y los contaminantes a eliminar. Las burbujas de aire, de naturaleza hidrofóbica, tienden a unirse a los contaminantes hidrófobos (tinta, stickies, pigmentos y ligantes) formando agregados que son eliminados en la superficie en forma de espumas. Las fibras hidrofílicas no tienen esa afinidad por las burbujas de aire y



permanecen en el interior de la suspensión. Este proceso es capaz de eliminar contaminantes con tamaños comprendidos entre 40 y 100 μ m. El objetivo principal de la flotación en la industria papelera es el destintado o eliminación de las tintas de impresión.

Para una flotación eficiente es necesaria una separación de las partículas de tinta de las fibras para que se puedan mover libremente por la suspensión. Para llevar a cabo esta separación, son necesarios procesos previos tanto mecánicos como químicos.

Las partículas de tinta de una suspensión pueden ser de tamaños muy dispares, por suerte, la mayor parte de partículas de tinta (derivadas de negro carbón y pigmentos) están dentro del rango de 0.02 a 0.1mm. Aunque las tintas base agua o tintas flexográficas aglomeradas están entre 1 y 5mm y los aglomerados de tinta offset pueden superar los 100mm.

4.4.1.1. *Modelo probabilístico*

Este modelo describe el proceso como una secuencia de subprocesos que implican:

La aproximación de una partícula de tinta a una burbuja de aire y su colisión en el seno de una fase acuosa.

La unión de la partícula de tinta a la superficie de la burbuja.

La formación de un contacto entre 3 fases.

La estabilización de los agregados formados y su transporte hacia la superficie en la que serán eliminados en forma de espuma.

Así, el proceso de flotación puede contemplarse como un proceso probabilístico en el que la probabilidad de flotación es la siguiente:

$$P_f = P_c * P_a * P_{CTF} * P_s$$

Donde los parámetros que intervienen en la ecuación son los siguientes:

- P_f : probabilidad de flotación.
- P_c : probabilidad de colisión.
- P_a : probabilidad de adhesión.

- P_{CTF} : probabilidad de que se produzca el contacto entre las tres fases
- P_s : probabilidad de estabilización.

A continuación, se describen brevemente cada uno de los parámetros.

Probabilidad de colisión

Durante el proceso de flotación, la colisión entre una partícula de tinta y una burbuja de aire se produce si la trayectoria de la partícula está situada dentro del “cilindro” de radio R_c alrededor de la burbuja de aire, como se muestra en la siguiente figura:

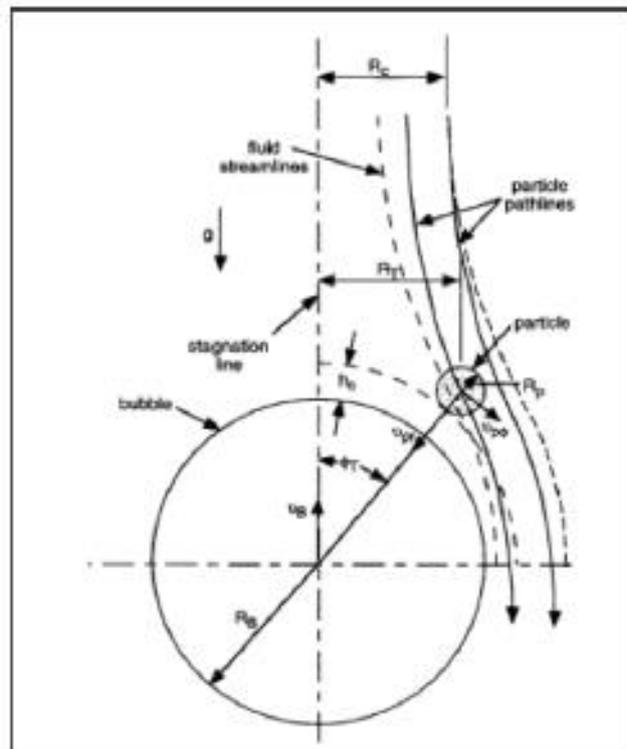


Figura I.4.30: Representación gráfica de las variables que influyen en la probabilidad de colisión.

R_c se conoce con el nombre de radio de captura y su valor dependerá de las características del flujo y del tamaño de la burbuja y de la partícula de tinta. La burbuja y la partícula se acercan entre ellas siguiendo sus respectivas líneas de flujo. Cuando entran en contacto dentro del radio de captura, la colisión se da correctamente.



La probabilidad de que la colisión se produzca viene determinada por la ecuación:

$$P_c = \left(\frac{R_c}{R_b}\right)^2$$

Donde:

- P_c : probabilidad de colisión.
- R_c : radio de captura.
- R_b : radio de la burbuja de aire.

La ecuación asume que las partículas de tinta son lo suficientemente pequeñas como para que las fuerzas inerciales que sufren sean despreciables y tienden a seguir las líneas de flujo alrededor de la burbuja.

Los resultados experimentales de modelización de esta probabilidad de colisión demuestran que un aumento del radio de captura conlleva un aumento de la eficacia de flotación. Existe un tamaño de burbuja óptimo que depende del tamaño de las partículas de tinta que se deben eliminar y de la dinámica de fluidos del régimen presente en el sistema.

La burbuja de aire debe ser unas cinco veces mayor que las partículas de tinta a separar. Para regímenes muy turbulentos, la estabilización requiere diámetros de burbuja mayores con respecto a la tinta. Por el contrario, si los diámetros de la tinta y de la burbuja son comparables, el nivel de turbulencia deberá que disminuir notablemente para conseguir que el agregado sea estable.

Las partículas con un diámetro superior a 100mm requerirán niveles de turbulencia inferiores a los que normalmente se encuentran en una celda de flotación. En cambio, las partículas de tinta muy pequeñas seguirán las líneas de flujo alrededor de las burbujas sin llegar a colisionar.

Para que el proceso de flotación sea eficiente, hace falta que se produzcan colisiones. Pero, al mismo tiempo es necesario que estas colisiones conlleven la adhesión de las partículas de tinta a la superficie de las burbujas, es decir, es necesario conocer los parámetros que afectan a la probabilidad de adhesión.

Probabilidad de adhesión

No todas las partículas que colisionan con una burbuja de aire se unen a ella. Para que tenga lugar la adhesión, es necesario que las partículas sean lo bastante hidrófobas para unirse a la burbuja mediante la formación de un contacto entre las tres fases (tinta, burbuja y líquido) con un ángulo de contacto finito. Cuando una partícula de tinta se acerca a una burbuja de aire a una distancia suficientemente pequeña, pueden tener lugar dos tipos de interacciones:

Una colisión de partículas grandes en la que la superficie de la burbuja se deforma enormemente y, se puede iniciar un contacto entre las tres fases o bien que la partícula rebote.

Un deslizamiento de pequeñas partículas a lo largo de la superficie de la burbuja con una leve deformación de la superficie (punto de contacto).

La interfase líquido-gas es deformable y si la inercia de la partícula es suficiente, ésta puede provocar una depresión sobre la superficie de la burbuja y colisionar o bien rebotar. El proceso de colisión se basa en el hecho de rotura de la capa líquida. La etapa final del proceso de colisión es la regresión de la película de agua mediante la cual el líquido se retira del punto de rotura o de agregación inicial entre partícula y burbuja y se forma un ángulo de contacto con el sólido. La probabilidad de adhesión está fuertemente influenciada por la físico-química de la suspensión.

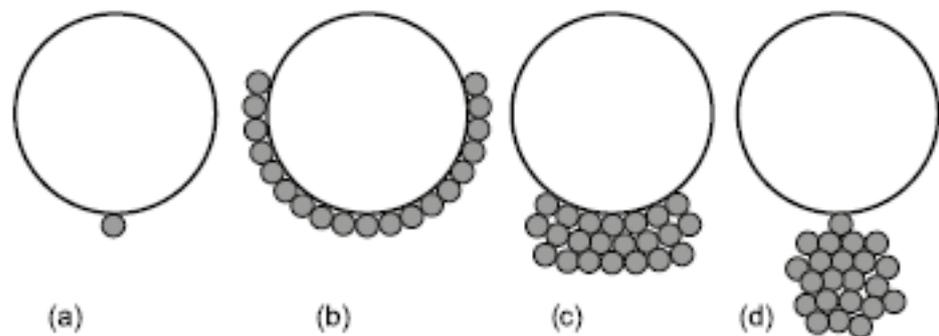


Figura I.4.31: Posibles formas en las que pueden adherirse las partículas



En la figura I.4.31 vemos las posibles estructuras que pueden adoptar las partículas una vez se han absorbido a la superficie de una burbuja de aire. La estructura de adhesión depende de la magnitud de las fuerzas de cohesión entre las partículas. Si las fuerzas de cohesión son débiles, la absorción se produce mediante una monocapa. Si las fuerzas de cohesión son un poco más elevadas, se puede producir la adhesión de una segunda capa de partículas a las ya adheridas a la burbuja. Finalmente, si las fuerzas de cohesión superan las fuerzas de adhesión, las partículas formarán un agregado que puede unirse a la burbuja a través de una sola partícula.

La adhesión de una partícula de tinta a la superficie de una burbuja de aire, conlleva la rotura de la película de suspensión que rodea la burbuja de aire, produciéndose un contacto entre tres fases (aire-tinta-suspensión). Una vez se ha formado el agregado, éste ha de mantenerse estable durante el proceso ascensional hasta la superficie de la suspensión, donde será eliminado en forma de espuma. Esta estabilidad va ligada a la probabilidad de estabilización.

Probabilidad de estabilización

La estabilización del agregado burbuja-partícula, desde el momento en que se forma hasta que alcanza la superficie espumosa, depende del sumatorio de fuerzas externas que actúan sobre él. Esta probabilidad de estabilización está controlada por la energía de adhesión del conjunto partícula/burbuja y en menor medida, por las condiciones hidrodinámicas que presenta de la suspensión.

La probabilidad de estabilización se calcula con un balance de las fuerzas, las fuerzas que actúan sobre las partículas esféricas en una interfase líquido gas son las siguientes:

- Fuerza de la gravedad (F_g).
- Fuerza de empuje estático sobre la parte inmersa (F_b).
- Presión hidrostática del líquido sobre el área de contacto (F_{hid}).
- Fuerza capilar ejercida sobre la línea de contacto entre las tres fases (F_{ca}).
- Presión capilar dentro de la burbuja de aire y que actúa sobre el área de contacto de la partícula adherida (F_{pc}).



- Fuerzas de separación adicionales representadas globalmente como el producto de la masa de la partícula por la aceleración, en el campo de flujo externo (F_d).

Las fuerzas que contribuyen a mantener unido el agregado son la capilar y la fuerza de la presión hidrostática, el resto de fuerzas contribuyen a separar la tinta de la burbuja.

4.4.1.2. *Modelo de cinética de primer orden*

Para este modelo, la ecuación cinética es la siguiente:

$$\frac{dC}{dt} = -k * C^n * C_b^m$$

Donde:

- C: concentración de partículas (nº partículas/L).
- C_b : concentración de burbujas de aire (nº burbujas/L).
- n y m: números adimensionales.
- t: tiempo de flotación (min).
- k: constante cinética de flotación.

Si consideramos el caudal de aire dentro de la celda de flotación constante y suficientemente grande como para asegurar que tanto la concentración de burbujas de aire como la superficie libre a la cual pueden adherirse se mantienen constantes, la expresión anterior se convierte en una cinética de primer orden:

$$\frac{dC}{dt} = -k * C$$

La constante cinética tiene que contemplarse como un factor de proporcionalidad necesario para comparar la flotación de diferentes tipos de partículas en condiciones determinadas. La constante cinética es función del caudal de aire introducido, del tamaño medio de las burbujas de aire y de las características de la celda de flotación además de la composición de la suspensión.

4.4.1.3. *Modelo de transporte de materia*

Es el modelo propuesto más reciente, este modelo explica la flotación a través de los mecanismos que permiten transportar las partículas de tinta desde el seno de la suspensión hasta las

espumas, considerando a éstas como sistemas dinámicos que están en contacto con la suspensión papelera durante buena parte del proceso de flotación.

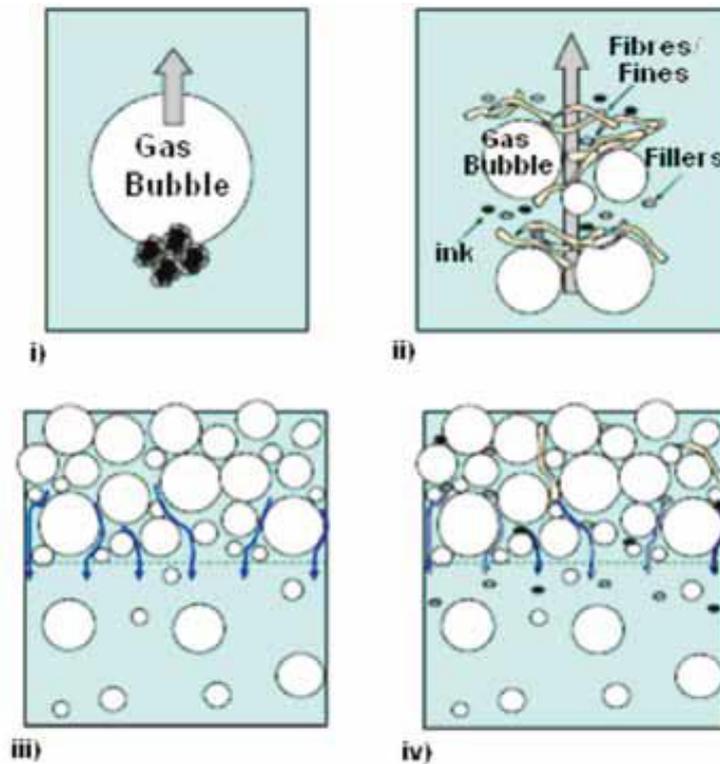


Figura 1.4.32: Mecanismos del modelo de transporte de materia

La figura 1.4.32 muestra el proceso, el primer mecanismo (i) se corresponde con el proceso de flotación descrito siguiendo una cinética de primer orden. El atrapamiento mecánico (ME) de las partículas sólidas (ii) hace referencia a todo tipo de partículas, es decir, hidrofóbicas e hidrofílicas arrastradas hacia la espuma por parte de las burbujas de aire. La transferencia de sólidos por atrapamiento mecánico es proporcional a la transferencia de agua hacia las espumas según la ecuación:

$$M_E = \Phi * \left(\frac{W * L_0}{t_f} \right) * t$$

Donde:

- Φ : coeficiente de transferencia de sólidos.
- $W \cdot L_0$: pérdida de agua cuando la espuma es eliminada a una altura 0 pasado un tiempo de flotación t_f .



El tercer mecanismo corresponde a la formación de espuma y drenaje del agua (WL) (iii) y se explica por el drenaje al que se ve sometido por la fuerza de la gravedad el agua presente en las espumas de flotación. Se puede expresar según la siguiente ecuación:

$$WL = \left(\frac{W * L_0}{t_f} \right) * e^{-L_D * h} * t$$

Donde:

- LD: coeficiente de drenaje del agua.
- H: altura de la espuma antes de ser eliminada.

Finalmente, el drenaje de las partículas sólidas (iv), es decir, de fibras, finos, cargas y partículas de tinta sería proporcional al caudal de agua según la expresión:

$$S_D = -\Psi * \left(\frac{W * L_0}{t_f} \right) * (1 - e^{-L_D * h}) * t$$

Donde:

- Ψ : coeficiente de drenaje de las partículas sólidas

Resumiendo, el proceso puede expresarse como:

$$P_R = F + M_E + S_D$$

Donde:

- P_R : probabilidad de flotación.
- F: flotación de partículas hidrofóbicas.
- M_E : atrapamiento mecánico de partículas sólidas
- S_D : drenaje de partículas sólidas.

4.4.1.4. *Tecnología del proceso*

Desde el punto de vista práctico, el mecanismo de eliminación de tinta se lleva a cabo mediante un proceso de aireación seguido de una mezcla y posterior separación de los agregados formados. Las



interacciones hidrodinámicas están involucradas en estos tres mecanismos básicos.

Aireación

Consiste en la introducción de una cantidad de aire previamente calculada y en unas condiciones controladas dentro de la celda de flotación. Esta cantidad de aire depende del tamaño de las burbujas y de la consistencia de la suspensión, con el fin de mantener un movimiento libre de burbujas y fibras. En condiciones normales de flotación este valor está próximo al 50% del volumen total de fluido.

Los mecanismos de formación de burbujas durante la aireación dependen de la tecnología de la celda de flotación. Dependiendo de la forma de introducir el aire, existen tres tipos de celdas de flotación:

- **Tipo I:** el diseño de este tipo de celdas estaba desarrollado en un principio para la flotación de minerales y fue adaptado a la industria del destintado. En ellas se introduce el aire de forma mecánica y las burbujas de aire se forman por agitación mecánica de la suspensión.
- **Tipo II:** introducen el aire de forma neumática a través de una membrana porosa o de un cilindro perforado. El tamaño de las burbujas de aire que se generan depende del diámetro de los agujeros, el flujo de aire y las propiedades superficiales de la suspensión papelera.
- **Tipo III:** introducen el aire de forma hidrodinámica por autosucción a través de inyectores por efecto Venturi. Esta succión del inyector depende de la velocidad de flujo y de la presión a la que está sometido el aire antes de ser liberado a presión atmosférica. El tamaño de las burbujas depende de la turbulencia que hay en la zona de aireo, así, elevadas turbulencias (velocidades de inyección altas), generan burbujas más pequeñas.

Mezcla

En esta parte del proceso los mecanismos físico-químicos de adhesión de las partículas de tinta a las burbujas de aire tienen una gran importancia, pero también son realmente importantes las interacciones hidrodinámicas.

El proceso de adhesión de la tinta a las burbujas de aire se lleva a cabo por la acción de una zona de flujo turbulento que es una

continuación de la zona de aireación. De hecho, la adhesión comienza una vez el aire introducido entra en contacto con la suspensión fibrosa, es decir, en la zona de aireación. El aspecto hidrodinámico de la unión de tinta a las burbujas de aire es muy complejo ya que es necesario considerar todo el campo de flujo turbulento y el movimiento de las partículas de tinta y de las burbujas de aire en cada uno de los remolinos en los que se ven atrapados durante un espacio de tiempo muy corto.

Eliminación del aire

Después de la zona de mezcla, la pasta entra en la celda de flotación propiamente dicha donde la turbulencia es inferior. Las burbujas en el proceso de ascensión pueden captar partículas de tinta siempre y cuando el volumen de la celda lo permita. Uno de los objetivos principales de la celda de flotación es eliminar los agregados tinta-burbuja. Si la velocidad de ascensión de la burbuja a través de la suspensión de pasta es inferior a la velocidad de salida del flujo de aceptados, o bien, si el tiempo de residencia es demasiado bajo como para permitir que la burbuja llegue a la superficie, entonces la tinta no será eliminada en las espumas y las burbujas de aire entrarán en el flujo de aceptados. Las burbujas de aire demasiado pequeñas o bien demasiado grandes no son efectivas para el destintado por flotación.

Celdas de flotación

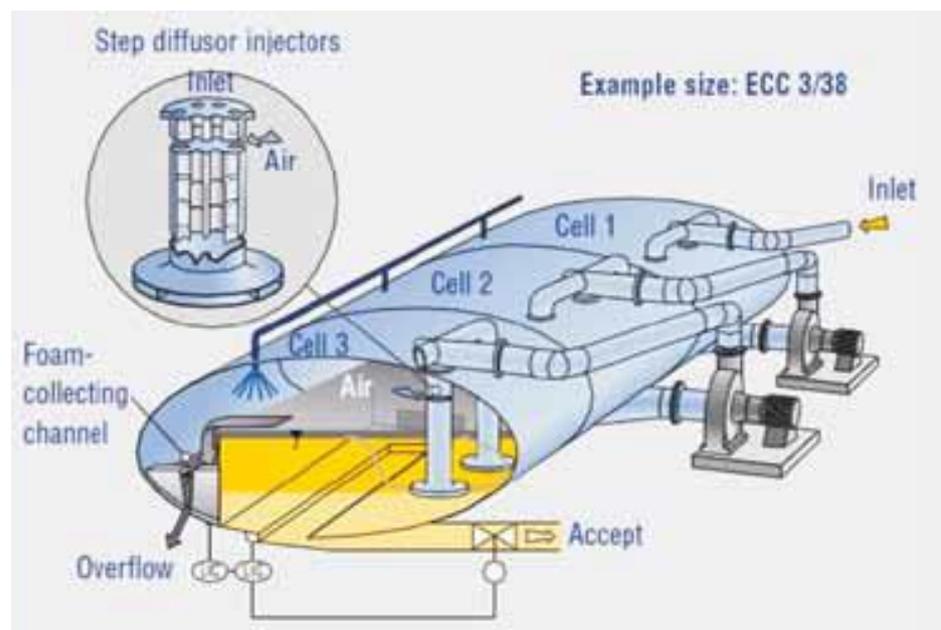


Figura I.4.33: Celdas de flotación



Hay varios diseños diferentes, las que vemos en la figura anterior, por ejemplo, son celdas elípticas constituidas por distintas celdas individuales (4 o 5 primarias y 2 secundarias). En ellas el stock de entrada se realiza por la parte superior que se mezcla con el aire que entra a través de los inyectores situados a medio camino del tubo de entrada vertical previo a la zona de mezcla. Las espumas se eliminan por rebose y normalmente se tratan en una etapa de flotación secundaria.

4.4.2. Lavado

El destintado por lavado es un proceso mecánico en el que la tinta y las partículas contaminantes se eliminan por espesamiento o aclarado de la suspensión papelera. El proceso se basa en la diferencia de tamaño que hay entre las fibras y las partículas de tinta. La separación se realiza depositando la suspensión de fibras y partículas de tinta sobre unos tamices que permiten el paso de las partículas de tinta y retienen las fibras. Las condiciones de lavado varían dependiendo del equipo escogido, aunque la mayoría de los sistemas comerciales se basan en un flujo de agua a contracorriente para minimizar el consumo de agua e incrementar el rendimiento en fibras.

Para que un lavado sea efectivo, las partículas de tinta deben tener un diámetro menor de 10mm (tintas dispersables). Los contaminantes disueltos y coloidales también son eliminados.

Para obtener una buena dispersión de las pequeñas partículas de tinta y una alta repulsión entre los elementos, es necesario modificar las propiedades superficiales. Esto se consigue incrementando el pH o añadiendo agentes dispersantes a la suspensión. Estos métodos impiden la aglomeración de las partículas, ya que incrementan la repulsión estérica entre ellas.

La eficacia del lavado también depende de la consistencia de entrada. Los equipos de lavado diseñados para trabajar con rangos de consistencias altos, es decir, espesando la pasta del 3% al 15-30%, normalmente son menos eficientes y más caros que los equipos de baja consistencia que espesan la pasta desde el 1% hasta el 5-10% de consistencia.



El destintado por lavado requiere un gran consumo de agua (hasta 100 m³/t) y por lo tanto proporciona un efluente considerable y muy cargado.

Los equipos usados en las etapas de lavado son los filtros de bandas, filtros de bandas a presión, filtros de disco, filtros estáticos, tamices curvados e inclinados y tamices a presión.

4.4.3. Productos químicos usados en el destintado

Las funciones principales de los productos químicos que se añaden a un tratamiento de papel reciclado son por un lado facilitar la liberación de la tinta, la estabilización y eliminación de ésta y por otro lado evitar las pérdidas de blancura de la suspensión cuando contiene porcentajes importantes de pasta mecánica.

La combinación necesaria de los productos químicos depende de la naturaleza del papelote y del proceso de destintado. Los productos químicos idóneos son aquellos capaces de convertir el papel en una pasta destintada de calidad aceptable con las instalaciones disponibles y unas condiciones de operación determinadas. Cualquier variación en la composición del papel o en el proceso de destintado va acompañado de un cambio en la composición de los productos químicos, aunque, actualmente se busca la formulación química más flexible para soportar estos cambios. Los productos químicos usados en el proceso son los siguientes:

Hidróxido sódico

Es utilizado para mejorar la individualización de las fibras y la separación de la tinta. La adición de hidróxido sódico aumenta el pH y la ionización de los grupos carboxílicos de las fibras de celulosa. Esta ionización incrementa la dispersión y la repulsión entre la fibra y la tinta como vemos en la siguiente figura:

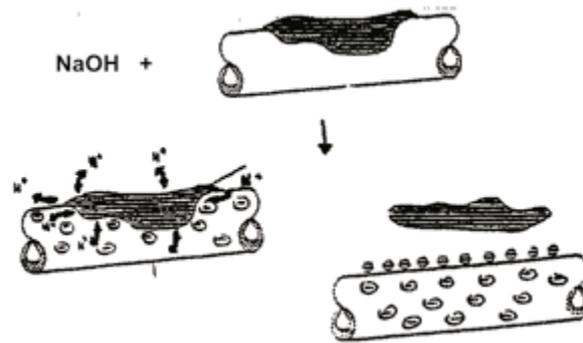
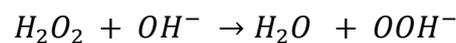


Figura I.4.34: Acción del hidróxido sódico en la liberación de los pigmentos de las tintas

La rotura de la tinta se complementa con los esfuerzos cortantes que se producen en el púlper. El hidróxido sódico también hidroliza los grupos éster de las partículas de tinta lo que provoca su rotura en pequeñas partículas y aporta a la suspensión moléculas de jabón que pueden actuar como tensioactivos.

La desintegración en presencia de hidróxido sódico también disminuye el consumo de energía puesto que el hinchamiento de las fibras, generalmente procedentes de pastas mecánicas, provocado por este reactivo mejora la humidificación de la suspensión haciendo decrecer rápidamente su resistencia, lo cual facilita la individualización de las fibras.

No obstante, también puede tener efectos negativos, si se adiciona a pastas mecánicas provoca que la suspensión tome un tono amarillento, esto es debido a la formación de grupos cromóforos en la lignina. El agente alcalino incrementa, por otro lado, la acción blanqueante del peróxido de hidrógeno produciendo aniones perhidroxilo de acuerdo con la siguiente reacción.



Por lo tanto, las dosis de hidróxido sódico añadidas tienen que mantener un equilibrio entre proporcionar suficiente alcalinidad para una buena saponificación, hidrólisis de las resinas y flexibilización de las fibras y minimizar la formación de cromóforos.



Peróxido de hidrógeno

Es añadido al proceso de desintegración de papeles recuperados para contrarrestar la pérdida de blancura que aporta el medio alcalino sobre las fibras procedentes de pasta mecánica. La forma en que actúa no está del todo clara, y hay 2 hipótesis al respecto.

- Por un lado, se cree que el peróxido de hidrógeno previene la formación de grupos cromóforos coloreados, así como también evita la reversión de blancura en la pasta química.
- La otra hipótesis considera que el peróxido no previene la formación de los grupos cromóforos, sino que los oxida una vez formados para eliminar el color.

De cualquier forma, el peróxido de hidrógeno se descompone fácilmente inactivando su efecto blanqueante. Esta descomposición puede tener dos causas:

Por una parte, puede ser debida a la elevada alcalinidad de la suspensión, lo que provoca una rotura heterolítica del peróxido, tal como se ve la siguiente reacción.



Por otro lado, la presencia de iones metálicos (manganeso, cobre, hierro, aluminio) pueden descomponer el peróxido mediante la siguiente reacción homolítica.

La descomposición heterolítica del peróxido es necesaria para generar los aniones perhidroxilo activos para el blanqueo, pero concentraciones elevadas de álcali aceleran la descomposición del agente blanqueante inactivándolo con el tiempo. Estas descomposiciones del peróxido de hidrógeno pueden minimizarse mediante el uso de agentes estabilizantes y agentes quelantes. Generalmente se utilizan los silicatos como agentes estabilizantes y el DTPA (ácido dietilentriaminpentacético) y EDTA (ácido etilendiamintetracético) como agentes quelantes.

Silicato sódico

El silicato de sodio tiene una función triple en el proceso:

- Estabiliza el peróxido de hidrógeno actuando como quelante de metales pesados mediante un mecanismo de intercambio iónico.
- Actúa tamponando el pH a un valor de 11,3, manteniendo así un nivel de alcalinidad adecuado para un destintado eficiente.



- Tiene un efecto detergente, dispersando la tinta que ha sido liberada y provocando su emulsión. Además, tiene características humectantes que ayudan a la penetración de los reactivos químicos del destintado en la superficie de las fibras, y previene la redeposición de la tinta liberada.

Otra ventaja de los silicatos es su precio, pero también tienen algunos inconvenientes:

- A elevadas dosis pueden precipitar en forma de silicato cálcico provocando incrustaciones en depuradoras, filtros y circuitos de agua. Este es un problema atribuido a su interacción con los iones calcio.
- Su naturaleza altamente aniónica perjudica el correcto funcionamiento de algunos productos químicos del destintado y contribuye a incrementar los valores de DQO de los efluentes a causa del poder dispersante de los sólidos en suspensión.

Debido a esto, es necesario limitar la cantidad de silicato que se adiciona en el proceso de destintado y compensar el efecto estabilizante. Se pueden utilizar otros tipos de reactivos químicos como las zeolitas, aunque raramente consiguen cumplir todas las funciones que tiene el silicato. Existen investigaciones sobre nuevos silicatos modificados e incluso distintos agentes alcalinos como $Mg(OH)_2$ que pueden aportar mejoras en la blancura de la pasta final, reduciendo la contaminación de las aguas y la demanda catiónica de las pastas DIP producidas.

Agentes quelantes

Son ligantes polidentados de naturaleza orgánica que generalmente contienen un grupo ácido y un grupo coordinado (un átomo con un par de electrones sin compartir. El agente quelante reacciona con los iones metálicos presentes en la suspensión fibrosa formando complejos solubles y evitando así la descomposición homolítica del peróxido de hidrógeno. Los quelantes más utilizados son el DTPA (ácido dietilentriaminpentacético) y el EDTA (ácido etilendiamintetracético). El DTPA es el agente quelante más utilizado para el destintado de papel gracias a su estabilidad ante la oxidación en medio alcalino.

Tensioactivos

La estructura molecular de los tensioactivos determina su comportamiento en las interfases y las propiedades físico-químicas de sus soluciones, y especialmente su capacidad de formar estructuras en medios coloidales. Los tensioactivos se pueden clasificar en cuatro grandes grupos en función de la naturaleza de la estructura hidrofílica: tensioactivos aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfóteros.



4.5. Requerimientos energéticos

A pesar de que como hemos visto en el apartado 1.4, las fábricas de papel reciclado tienen un consumo energético significativamente menor que las fábricas de papel virgen, este sigue siendo el principal coste de operación. Además de para el secado del papel, son necesarias grandes cantidades de vapor para el calentamiento de agua, pasta, químicos y aire hasta la temperatura óptima para el proceso.

Hay que tener en cuenta también el consumo eléctrico para alimentar la maquinaria, el bombeo de la pasta, la ventilación y tratamiento de las aguas residuales.

En la tabla I.4.3 podemos ver los consumos energéticos individualizados de las principales etapas para preparación de pasta de fibra reciclada para la producción de papel onda o test liner.

Tabla I.4.3: Demandas específicas de energía en las operaciones de proceso de producción de papel onda y papel testliner

Etapas	Demanda de energía (kWh/t)
Desfibrado	10-20
Despastillado (desfibrado secundario)	20-60
Depuración por zarandas	5-20
Recuperación de fibras en la depuración	20-40
Depuración ciclónica	4-8
Fraccionamiento	5-20
Dispersión	30-80
Refino a baja consistencia	20-10

4.6. Avances Biotecnológicos

La necesidad de las industrias de encontrar soluciones biotecnológicas ha cambiado, hoy en día los objetivos generales de las industrias papeleras son incrementar la eficiencia en costos, desarrollar tecnologías benignas ambientalmente hablando y mejorar la calidad de sus productos. Los métodos biotecnológicos podrían ayudar a resolver estos inconvenientes. Debido al rápido desarrollo de nuevas tecnologías en biociencias, se ha hecho difícil juzgar la competitividad y viabilidad económica de aproximaciones biotecnológicas, de cualquier manera cualquier



observación proveniente de la investigación puede llegar a ser un punto de partida para el éxito de estos procesos en un futuro.

El empleo de bioproductos ha reducido la cantidad de desechos y el consumo energético de forma notable, como es el caso del uso de tintas biodegradables provenientes de la semilla de soya, empleadas en impresiones, lo cual hace el proceso de reciclado más fácil.

Los destintados convencionales utilizan una gran cantidad de reactivos químicos los cuales requieren costosos sistemas de tratamiento de aguas residuales. El desarrollo de nuevos tratamientos biológicos como el destintado enzimático han tenido un gran interés debido a su alta eficiencia y bajo impacto ambiental.

Existen tres grandes objetivos que se quieren atacar mediante el uso de enzimas:

- Algunos componentes sobre la superficie de la fibra: Hemicelulasas y celulasas pueden alterar la superficie de las fibras por medio de una modificación de los enlaces químicos y por lo tanto liberan la tinta para poder ser removida por lavado o flotación.
- Almidón estucado: puede ser hidrolizado por enzimas amilolíticas.
- Tintas a base de aceites vegetales: pueden ser degradadas por lipasas.

Una propuesta biotecnológica de destintado es una propuesta alternativa al empleo de productos químicos en la etapa de desintegración. La metodología enzimática emplea un medio neutro, lo cual permite una reducción de la carga de contaminantes.

4.6.1. Destintado enzimático

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

El proceso de destintado puede ser sustancialmente mejorado con la adición de varias enzimas a la mezcla de surfactantes. El destintado enzimático es una de las técnicas más empleadas en el destintado de papel. Los surfactantes y las enzimas se deben escoger cuidadosamente para poder eliminar la desactivación de la enzima. Las enzimas amilasas, celulasas, lipasas y



hemicelulasas son las más estudiadas y por lo que se conoce más acerca de sus composiciones y condiciones de trabajo. Las lipasas actúan sobre la tinta, mientras que las otras enzimas actúan sobre el almidón empleado en recubrimientos del papel o sobre la celulosa alrededor del área impresa.

El proceso de destintado está íntimamente relacionado con el método de impresión, el tipo de tinta usada y el método empleado para secar la tinta.

Las tintas de impresión son materiales viscosos que tienen una apariencia homogénea, están constituidas por al menos dos fases. Los componentes de las tintas de impresión se pueden dividir en:

- **Los pigmentos** causantes de color o con menos frecuencia **colorantes solubles**: los pigmentos hacen parte de la fase dispersa de la tinta y pueden ser de origen inorgánico y orgánico. Entre los inorgánicos son típicos el “amarillo de cromo”, los “naranjas de molibdeno” y los “rojos de cadmio”. Los orgánicos son sales obtenidas por reacción de diferentes sustancias. El tipo de pigmento más común para tintas de impresión es el negro de carbón. Del pigmento/colorante puede decirse que las dificultades de destintado resultan principalmente por la presencia de los colorantes solubles, pues estos no se remueven por flotación ni por lavado, estos deben ser decolorados por blanqueo, usando peróxido de hidrógeno comúnmente.
- **El vehículo**: es un fluido que dispersa el pigmento y le da a la tinta fluidez. Está compuesto de una mezcla de oligómeros y polímeros en uno o varios solventes. El vehículo tiene dos principales papeles, por un lado debe asegurar el transporte y el vínculo de la tinta sobre el sustrato; y por otro lado, cuando la tinta se seca, parte o todo el vehículo debe formar una película continua en la superficie del sustrato. El vehículo está compuesto por aceites vegetales o minerales, o por disolventes (agua o alcoholes, hidrocarburos aromáticos, ésteres y cetonas) Si el solvente o diluyente es agua tales como el caso de las tintas flexográficas o tintas de chorro, los pigmentos son más o menos solubilizados después del repulpeo con el resultado de un pigmento de muy pequeño tamaño que no flota. Cuando el vehículo contiene componentes insaturados como aceites vegetales, estos se oxidan con el tiempo o a altas temperaturas, y las dificultades en el destintado se deben porque la tinta se vuelve frágil evitando una buena flotación.
- **Los aditivos**: corrigen o mejoran las características específicas de la tinta. Son normalmente ceras, catalizadores de secado,



antioxidantes, y antiespumantes. Se emplean en pequeñas cantidades (menos del 10% en peso) lo que hace que tengan un impacto reducido sobre el proceso de destintado, sin embargo, los catalizadores de secado son muy perjudiciales, pues aceleran la oxidación de la tinta, dando como resultado una tinta frágil fuertemente fijada en la fibra.

Los ataques enzimáticos son de dos tipos: ataque sobre las partículas de tinta y ataque sobre la superficie de las fibras.

Las lipasas y esterasas pueden degradar tintas a base de aceites vegetales. Las pectinasas, hemicelulasas, celulasas y enzimas lignolíticas provocan alteraciones sobre la superficie de la fibra y por tanto liberando la tinta por lavado o flotación.

Para lograr las modificaciones en las fibras, se han combinado enzimas y microorganismos con tratamientos químicos y mecánicos. La especificidad de las enzimas las convierte en herramientas únicas para modificaciones específicas de componentes específicos de las fibras y su naturaleza catalítica la convierte en una sustancia muy eficiente en dosis muy pequeñas.

Las limitaciones de su uso en cuanto a pulpa y papel están relacionadas con el tamaño y las propiedades de las enzimas. La acción enzimática está limitada a superficies accesibles de las fibras debido al tamaño macromolecular de las enzimas. La inactivación y la destrucción de las estructuras de proteína de las enzimas debido a condiciones empleadas en diferentes etapas de pulpeo y producción de papel, han conducido a una separación y un desarrollo de pretratamiento enzimático. Esto permite ajustar unas mejores condiciones para la enzima.

La degradación enzimática de material lignocelulósico incluye una amplia variedad de enzimas. Las celulasas son las más estudiadas hasta el momento, incluso su mecanismo de acción se conoce. La tendencia comercial se ha dirigido últimamente a las enzimas hidrolíticas y a las oxido-reductasas, las cuales parecen ser las enzimas de la próxima generación ya que tienen un gran potencial de aplicación en muchos de los productos comerciales.

El pretratamiento de astillas de pino con enzimas lignolíticas como la lacasa, ha disminuido la energía del pulpeo mecánico en 6-8% y el pretratamiento con manganeso peroxidasa parece tener efectos similares. El mecanismo de estos efectos son la probable despolimerización o modificación de la estructura de la lignina, aunque

no se han detectado pérdidas de masa en el tratamiento. El pretratamiento de astillas de madera con enzimas que degradan polisacáridos (celulasas, xilanasas y pectinasas) brindan un mejor pulpeo kraft (menos rechazo e incremento de la deslignificación). Este mecanismo puede involucrar que las partes no lignificadas de las maderas son degradadas y esto ayuda en la penetración del licor blanco en las astillas de madera durante el pulpeo. El pulpeo de materias primas no maderables con ayuda de enzimas agrega mejores posibilidades.

En la figura I.4.35 se muestran los ejemplos de aplicaciones biotecnológicas en la industria de la pulpa y el papel.

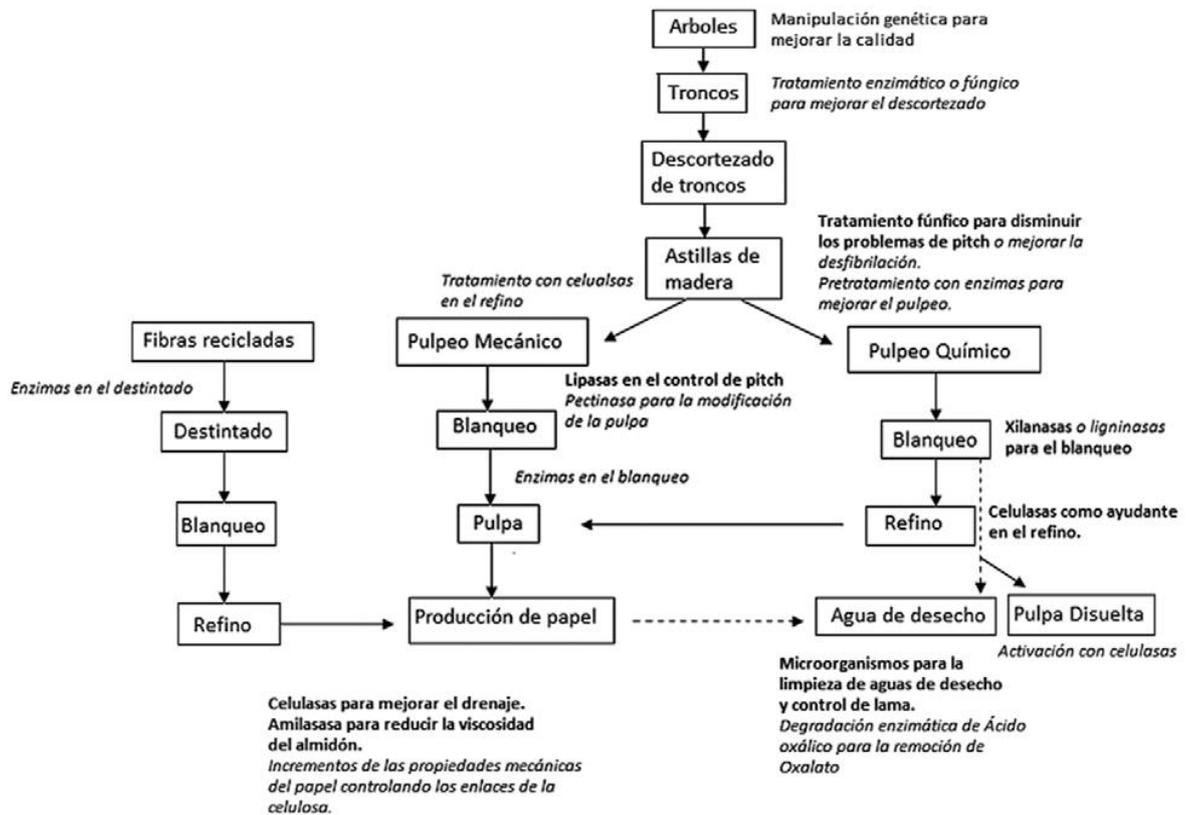


Figura I.4.35: Proceso de producción de pulpa y papel utilizando enzimas.

Las amilasas son muy eficientes para limpieza de sistemas de encolado de almidón que incluyen cuchillas encoladoras, sistemas de adhesivos para corrugado y prensas de encolado. Las amilasas son útiles en eliminaciones de impurezas con enzimas donde el adhesivo primario en los depósitos lo constituye el almidón.



Se ha demostrado que las celulasas mejoran el destintado de fibras secundarias modificando las superficies de las fibras y liberando la tinta. Ellas son usadas en conjunto con surfactantes, dispersantes y espumantes de flotación para reducir considerablemente el conteo de puntos negros y aumentar la blancura en pulpas destintadas de papel reciclado, procesadas a partir de mezclas de papel desperdicio de oficina. También se han mostrado mejoras en el drenaje de pulpas de fibras secundarias mediante el uso de celulasa en lugar de batido y refinación.

4.7. Gestión ambiental

La Confederación de Industrias Papeleras Europeas (CEPI) ha indicado que una de las consecuencias positivas del reciclaje sobre los gases de efecto invernadero, es la no emisión del metano que se produciría si el papel se enviara a los vertederos. El aumento del reciclado tiene también impacto sobre el carbono almacenado en los bosques. Al reciclar se evita el almacenamiento de carbono en los vertederos y los productos reciclados dejan de estar disponibles para la generación de energía de biomasa. El balance debe incluir a las emisiones asociadas con el reciclaje, debidas al proceso de fabricación y el transporte, como elementos de la huella.

El modelado, desde el punto de vista del ciclo de vida, indica que el reciclado es igual o mejor para el ambiente que la incineración con recuperación de energía, solamente cuando la tecnología de reciclado de papel es de un elevado nivel ambiental. Sin embargo, cuando el modelo incluye la sustitución de la energía de combustibles fósiles por la producción de energía procedente de la biomasa asociada al reciclado (contaminantes orgánicos), el reciclado es más beneficioso que la incineración.

El papel de desecho puede reciclarse 5 o 6 veces (según estimaciones de laboratorio), pero en cada reciclo pierde del 15 al 20 por ciento de las fibras largas, sobre todo en el caso de pulpas químicas. Es por esto que las fibras recicladas deben muchas veces mezclarse con pulpa virgen para obtener papeles de resistencias apropiadas. Como consecuencia, la relación teórica entre el consumo de fibra virgen y la utilización de papel recuperado es no lineal. Teniendo en cuenta este límite físico, el requerimiento energético teórico es óptimo para un porcentaje de reciclado del 93% para papel producido a partir de pulpa química y del 81% para papel producido a partir de pulpa mecánica.



Estudios de comparación del costo total del sistema cuando se utiliza madera como materia prima con el del reciclado de papel usado, revelan que el reciclado de papel es una opción económica en comparación con la madera como materia prima.

Los países en todo el mundo expresan los objetivos del reciclado del papel recuperado en términos de recuperación y tasas de utilización. La recuperación relativa del papel de desperdicio y su uso son en gran medida determinados por el mercado y dependen de factores económicos, tales como la intensidad de la población y la competitividad en el mercado mundial de productos de papel y cartón.

Otro tema interesante que pocos tienen en cuenta es que con el desarrollo de los sistemas de gestión de residuos modernos, se ha observado un notable incremento en las distancias de transporte de los mismos. La pregunta que surge es si el reciclado sigue siendo ecológicamente ventajoso considerando las emisiones producidas por el transporte o si es preferible la directa eliminación de los desechos. Puede demostrarse cómo las distancias de transporte influyen en los beneficios ecológicos del reciclado. Por ejemplo, un estudio sobre Europa comprobó que el reciclado de papel es beneficioso considerando el transporte a distancias de hasta 4400 km. Esta distancia disminuye en la medida que aumenta el coste de los combustibles fósiles y análogos.

La transformación del papel recuperado en nuevos productos genera residuos, tanto por los procesos de destintado como por otros. Como media puede afirmarse que un 15% del material se perderá. Actualmente se está trabajando en la disminución de las pérdidas, vía recuperación de sus componentes, fibras, finos y cargas, que en algunos casos como pigmentos de estucado pueden suponer un valor añadido importante. El resto de contaminantes, tintas, tensioactivos, plásticos, metálicos y stickies, pueden ser tratados en sistemas de depuración internos y externos convencionales, yendo a parar los residuos a vertederos controlados e incineración. Ello conlleva, a causa de su volumen, muy poco impacto ambiental.

La preocupación por el ambiente ha obligado a las empresas a definir políticas de protección ambiental. Un primer paso para lograr una producción ambientalmente amigable es identificar las posibles fuentes de contaminación de todos los procesos y operaciones de las fábricas y disminuirlas lo máximo posible. Las mejores técnicas disponibles (MTD) identifican a la última etapa de desarrollo disponible de las instalaciones, procesos, o métodos de operación, que indican la adecuación práctica de un proceso u operación particular, para limitar las descargas. Este concepto de mejores técnicas disponibles tiene en cuenta los costos y



beneficios de las medidas para proteger el ambiente tomadas en conjunto, para evitar crear problemas nuevos y más serios (efectos económicos y cruzados). Por ello, previamente a asegurar que una técnica puede definirse como MTD, se analizan: toxicidad humana, calentamiento global, toxicidad acuática, acidificación, destrucción de ozono y potencial de creación fotoquímica de ozono. El documento técnico original concerniente a la industria de pulpa y papel se inició en 1997, fue aprobado en 2000 y adoptado por la Comisión de la Unión Europea en 2001. Estas MTD están actualmente en revisión. Estos documentos establecen que los problemas ambientales de las fábricas de papel reciclado son, básicamente, las emisiones atmosféricas, los residuos sólidos y las emisiones al agua, y, al igual que en todos los procesos de producción de papel, los requerimientos energéticos y de agua.

4.7.1. Emisiones al agua

4.7.1.1. *Tratamiento interno*

En el proceso de fabricación de papel se utilizan grandes cantidades de agua. Aproximadamente en el ingreso a la máquina de papel, la suspensión fibrosa tiene una relación en peso de 200 a 1 entre agua y el material suspendido. La mayor parte de este volumen se extrae durante la formación inicial del papel (dando lugar a la corriente conocida como aguas blancas) y parcialmente utilizado en la etapa de preparación de pasta para dilución.

El proceso productivo incluye, además, otras aplicaciones de agua que no resultan incorporadas directamente a las corrientes fibrosas de producción, como es el caso de regaderas para limpieza de telas y fieltros, sellos hidráulicos, extracción de rechazos en depuradores y enfriamiento de ciertos equipos. Para estas aplicaciones se utiliza, según los requerimientos puntuales, “agua fresca” o “agua clarificada”. La primera corresponde al suministro a planta y la segunda es parte del agua blanca sometida a operaciones de remoción de sólidos suspendidos.

Otro circuito es el de agua desmineralizada/condensado correspondiente al sistema de generación de vapor para el secado. Si se practica un uso intensivo de las aguas recuperadas en la sección húmeda de la máquina de papel, es posible que el sistema



opere sin generación de aguas residuales, en lo que se conoce como “circuito cerrado”.

Hay experiencias industriales con este tipo de operación, pero dan lugar a aguas de proceso con alta concentración de sólidos disueltos y coloidales (orgánicos e inorgánicos) que puede derivar a su vez en problemas de operación, calidad de producto y corrosión.

Una posibilidad de contrarrestar estos efectos, que resulta de particular interés para la fabricación de papel reciclado, es la incorporación de una depuración de las aguas blancas mediante procesos biológicos y fisicoquímicos. Estos tratamientos, que se ubican en el interior del proceso productivo y son independientes de la depuración del efluente final permiten reducir la acumulación en las aguas de sustancia orgánicas e inorgánicas y, en consecuencia, aumentar el nivel de cerramiento de circuitos. Valores típicos de consumo de agua en fábricas de papel reciclado con un adecuado nivel de cerramiento de circuitos están en el orden 4 a 20 m³/t de papel producido.

El caudal de agua fresca que ingresa a la planta resulta aproximadamente igual a la suma del caudal del efluente final y la cantidad de agua evaporada del papel durante el secado. Esta última puede ser estimada en 1 m³/t de papel producido.

El efluente final de la planta se integra con corrientes parciales originadas en distintas etapas del proceso, como depuración, descargas accidentales de piletas, sellos hidráulicos y limpieza de fieltros. Con respecto al contenido de sustancias potencialmente contaminantes en los efluentes crudos de fabricación de papel, resultan de importancia los sólidos en suspensión y la materia orgánica biodegradable. Los sólidos en suspensión pueden generar turbiedad y depósitos en el cuerpo del agua receptor. Son cuantificados como sólidos suspendidos totales por filtración, como volumen sedimentable. Los sólidos en suspensión comprenden material fibroso y cargas minerales, incorporadas al sistema como componentes de la materia prima fibrosa utilizada (papeles recuperados).

La materia orgánica biodegradable, en solución o suspensión, puede producir consumo de oxígeno en el cuerpo receptor a través del metabolismo de ciertos microorganismos. Es cuantificada mediante análisis de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) o carbono orgánico total (COT). La DBO de efluentes en fabricación de papel es causada por



sustancias ingresadas al sistema a través de la materia prima fibrosa utilizada, otras extraídas por mecanismos físico-químicos durante el procesamiento de las fibras o bien incorporadas como aditivos de proceso. Esta materia orgánica está constituida, por almidones, aditivos derivados de la celulosa y productos de degradación de celulosa y hemicelulosas.

Las características y la cantidad de sólidos en suspensión y materia orgánica biodegradable contenidos en el efluente crudo dependen de la materia prima fibrosa, los aditivos de proceso, las condiciones operativas y el manejo de los efluentes parciales. Sobre la base de unas mismas condiciones de proceso los niveles de concentración dependen del consumo de agua fresca.

Las mejoras internas permiten lograr ahorros en el tratamiento externo, tanto en inversión como en costos operativos, y en muchos casos reducir las pérdidas de materia prima fibrosa. En la línea de métodos internos es recomendable trabajar sobre el manejo de rechazos en depuración, sellos hidráulicos en ejes de bombas y equipos, el ajuste de caudales en regaderas de agua fresca y el reemplazo en algunas aplicaciones de agua fresca por agua clarificada. Se supone que el agua extraída en la sección húmeda de la máquina de papel (agua blanca) es utilizada en forma directa para diluciones en la sección preparación pasta y que el excedente es derivado a recuperación de fibras y agua (obtención de agua clarificada) mediante operaciones de filtración, flotación o sedimentación.

4.7.1.2. *Tratamiento externo*

La reducción del consumo de agua fresca en fabricación, aunque implica un incremento en las concentraciones de sólidos suspendidos y disueltos en el efluente, se traduce en significativas ventajas económicas con respecto al tratamiento externo.

Para la remoción de sólidos en suspensión resultan adecuados los procesos de sedimentación por gravedad, flotación y centrifugación.

La sedimentación por gravedad es el método más simple en cuanto a la operación. Se lleva a cabo en recipientes circulares o rectangulares, provistos de “barredores” de fondo y superficie para la extracción de sedimentos y material flotante respectivamente. El



parámetro básico para el diseño de sedimentadores es la velocidad superficial, determinada por el cociente entre el caudal del efluente y la superficie libre del líquido, que puede ser estimada en 1 m/h .

En los procesos de flotación se generan burbujas en el efluente, principalmente mediante disolución de aire bajo presión, que se adhieren a los flóculos y provocan su ascenso a la superficie. El material flotante es removido por medios mecánicos. La flotación ha resultado muy eficiente para efluentes de reciclado debido a las características de las partículas en suspensión cuyos flóculos suelen presentar una tendencia a la flotación.

Ofrece también la ventaja de requerir menor espacio que la sedimentación por gravedad.

La centrifugación también ha resultado muy eficiente para los efluentes de reciclado. Presenta ventajas en cuanto al requerimiento de espacio y un relativamente bajo contenido de agua en los sólidos separados. Se deben tener en cuenta aspectos particulares como inversión, mantenimiento y consumo de energía.

Los sólidos removidos por sedimentación y flotación, identificados como barros o lodos primarios, presentan un elevado contenido de agua, de modo que deben ser sometidos a operaciones de deshidratación. Esta compactación es generalmente realizada mediante prensas de banda. Los equipos centrífugos producen barros con un relativamente bajo contenido de agua.

Con respecto a la remoción de materia orgánica biodegradable (DBO), etapa de la depuración conocida como tratamiento secundario, resultan adecuados los procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos convencionales. En ellos las sustancias biodegradables son tomadas como sustrato por colonias mixtas de microorganismos, y son eliminadas del efluente por conversión, principalmente, a masa de microorganismos (sólidos en suspensión extraíbles por medios físicos), productos gaseosos del metabolismo y agua.

Entre los sistemas aeróbicos, los más difundidos son los procesos conocidos como “barros o lodos activados” (BA) y “lagunas aireadas” (LA). Ambos son similares en cuanto a la acción microbiana (bacterias aeróbicas de crecimiento espontáneo) pero se diferencian de acuerdo con las condiciones impuestas al medio. Constan de dos etapas en serie: tanque o laguna de aireación para la acción microbiana y posterior separación de microorganismos



del efluente tratado. Esta separación se realiza generalmente por sedimentación, aunque también puede emplearse flotación en el caso de barros o lodos activados.

En el tratamiento de BA la concentración de microorganismos en el tanque de aireación es de unos 5000 g/m³, la cual se obtiene mediante recirculación parcial de los sólidos separados. El tiempo de permanencia en aireación es del orden de 4 a 10 horas.

En lagunas aireadas el nivel de concentración de microorganismos es bajo, de 200 a 400 g/m³ y no se practica recirculación de los microorganismos separados en la segunda etapa. El tiempo de residencia en aireación es mayor, y está comprendido entre 5 y 15 días.

En los recipientes de aireación el líquido debe contener oxígeno en solución y un nivel de agitación que favorezca la actividad de toda la masa microbiana presente, especialmente en BA. Estas condiciones son proporcionadas por equipos de aireación, hélices o turbinas en la superficie. En BA también suele emplearse burbujeo de aire mediante un sistema de soplador y difusores.

El sistema de BA ha resultado muy conveniente para tratar efluentes de reciclado, dado que permite alcanzar eficiencias de remoción de DBOs superiores al 90%, ocupa menor espacio que las lagunas y requiere menor consumo de energía para aireación. Como desventajas aparecen la necesidad de un mayor control del proceso y una mayor generación de sólidos (barros o lodos secundarios).

El tratamiento con LA es adecuado cuando se dispone de suficiente espacio y no se requieren eficiencias de remoción de DBO elevadas.

Otra opción para el tratamiento de efluentes de las fábricas de papel reciclado son los tratamientos anaeróbicos, en los que intervienen bacterias que se desarrollan en ausencia de oxígeno. Requieren baja ocupación de superficie, son aplicables a efluentes con elevada carga orgánica y ofrecen la posibilidad de generación de energía a partir del biogás que producen. Son utilizados en procesos de dos etapas, en los cuales actúan como depuración gruesa seguida por un tratamiento de BA.

Los procesos biológicos requieren la adición de fuentes de nitrógeno y fósforo para tener un adecuado desarrollo microbiano. Además de los tratamientos primario y secundario mencionados,



las plantas de tratamiento incluyen una etapa previa para el acondicionamiento del efluente y una posterior para el manejo del material sólido extraído. Dado que los sólidos extraídos presentan un alto contenido de agua, son sometidos a deshidratación por prensado.

La selección de los procesos de tratamiento más convenientes y la obtención de los parámetros básicos de diseño deben estar basadas en adecuados estudios de laboratorio y planta piloto.

Un ejemplo de características del efluente final en fábricas de papel dedicadas a diferentes tipos de productos que cuentan con la implementación de mejoras internas y tratamiento externo primario y secundario puede ser el siguiente:

- Caudal: de 5 a 15 m³/t.
- DBO₅: de 0,02 a 0,3 kg/t y de 4 a 19 g/m³.
- DQO: de 0,3 a 5 kg/t y de 65 a 335 g/m³.
- Sólidos suspendidos totales: de 4 a 25 g/m³.

4.7.2. Emisiones a la atmósfera

Las emisiones al aire pueden ser producidas a partir de varias fuentes:

- La generación de energía (fuente principal).
- La incineración de residuos.
- Los olores de vapores y de la planta de tratamiento de efluentes (local).

Una cuestión clave en el reciclado de papel es el impacto del uso de energía en la fabricación. El procesamiento de residuos para la fabricación de papel y cartón requiere de energía que normalmente se obtiene a partir de combustibles fósiles, como petróleo y carbón. En contraste con la producción de pulpa química virgen, el tratamiento del papel recuperado no genera energía, por lo cual debe suministrarse energía externa para secar el papel. Por lo tanto, el ahorro de energía lleva aparejada la reducción de las emisiones atmosféricas.

Las emisiones procedentes de la generación de energía dependen básicamente del tipo de combustible utilizado, siendo para gas, principalmente CO₂, y NO_x, y para fuel oil o carbón, CO₂, NO_x, SO₂, polvo y bajas cantidades de metales pesados. Estas emisiones se producen en el sitio de la generación. Las emisiones de azufre de calderas de combustibles líquidos o carbón, depende de su cantidad en los



mismos. Para reducir el consumo de energía y las emisiones atmosféricas se consideran las siguientes medidas:

1. Cogeneración de calor y electricidad.
2. Mejora de las calderas existentes, instalación de calderas con tecnologías de bajo NO_x y uso de combustibles de bajo contenido de azufre.
3. Instalación de sistemas con menor consumo de energía y uso de fuentes renovables para reducir las emisiones de dióxido de carbono de fuentes fósiles.

Las emisiones por unidad de calor o potencia generados disminuyen considerablemente como resultado del aumento de la eficiencia térmica de la cogeneración. La cogeneración de vapor y energía (93% de eficiencia del combustible) disminuye el consumo de combustible, las emisiones globales de CO_2 (el 50% con respecto a las calderas de potencia convencionales) y otros contaminantes del aire, debido a la elevada eficiencia térmica. En un sistema de cogeneración con turbina de gas en ciclo combinado se logra la mayor eficiencia térmica posible. Adicionalmente, se independiza la fábrica de las fuentes externas de energía y muchas veces se produce un exceso de energía que puede venderse al sistema público.

Los residuos de fabricación del papel reciclado poseen una elevada carga orgánica (plásticos, fibras, finos, barros de destintado, barros del tratamiento de efluentes), por lo cual la incineración que combina generación de calor y energía es una buena solución. Los rechazos del reciclado de cartones y papeles no destintados presentan un elevado valor calórico (22 a 24 MJ / kg seco) debido a la alta proporción de plásticos, por lo que son adecuados para la producción de energía. Sin embargo, los residuos del procesamiento de papel reciclado en las fábricas de testliner (4 a 10% del papel recuperado) son, en general, insuficientes para operar económicamente una instalación de incineración. Por lo tanto, esto se instala sólo en grandes fábricas modernas. La opción de deshidratar los rechazos y lodos en fábrica para obtener mayor proporción de sólidos secos y posteriormente incinerarlos con recuperación de energía, reduce la cantidad de residuos que se depositan en vertederos, pero podría alterar las emisiones al aire.

De una u otra forma, las emisiones al aire de la incineración (gases de combustión) deben ser tratadas para eliminar los contaminantes. La aplicación y el cumplimiento de modernas normas de emisión y el uso



de avanzadas tecnologías de control de la contaminación, han reducido las emisiones al aire a niveles en los cuales los riesgos de contaminación por las incineradoras de residuos se consideran hoy en día muy bajos.

Las emisiones de dióxido de azufre, ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno y metales pesados, dependen principalmente de la estructura de los residuos y de la calidad de la limpieza de los gases de combustión.

La emisión de partículas sólidas, HCl, SO₂, NO_x y CO debe monitorearse en forma continua. Para eliminar el SO₂ y HCl puede incorporarse un lavador de gases en dos etapas con hidróxido de sodio. El líquido del scrubber se neutraliza y se trata con floculantes para remover metales pesados. Los lodos que contienen metales pesados se depositan en un vertedero. Otra opción para minimizar el HCl y SO₂ es inyectar hidróxido de calcio seco pulverizado en la corriente de gases.

Los óxidos de nitrógeno denominados NO_x (NO y NO₂) emitidos por las plantas de incineración de desechos proceden de la conversión del nitrógeno contenido en los residuos (NO_x del combustible) y de la conversión del nitrógeno del aire en la combustión (NO_x térmico).

La reducción de estas emisiones se puede realizar mediante reducción selectiva no catalítica (SNCR) con amoníaco, que se inyecta en la cámara de combustión.

Las emisiones de CO y compuestos orgánicos volátiles (VOC) están determinadas principalmente por los parámetros técnicos del horno y el grado de heterogeneidad de los residuos. Las dioxinas y furanos que se generan a partir de los residuos se destruyen de manera muy eficiente si se utilizan temperaturas elevadas de incineración y condiciones apropiadas de proceso. Temperaturas mayores a 850 °C y niveles de oxígeno superiores al 6% evitarán eventuales emisiones de VOC, CO y dioxinas. En el caso de eventuales emisiones de dioxinas, puede inyectarse en la corriente de gases de salida una mezcla de carbón activado o coque y zeolita. Los adsorbentes son depositados en vertederos.

Las emisiones de polvo son muy dependientes a los resultados de tratamiento de efluentes gaseosos. Las partículas sólidas se eliminan con un precipitador electrostático y un filtro de tela. En el caso de fábricas con circuitos de agua muy cerrados (por debajo de los 4 m³/t), puede producirse algo de olor a ácido sulfhídrico. También puede



producirse olor a H₂S por largos tiempos de retención del agua de proceso en cañerías y recipientes o por depósitos.

Los problemas puntuales de olor deben manejarse con sistemas bien diseñados y controlados, mediante una cuidadosa ingeniería de procesos. Si se incineran los residuos de fabricación de papel destintado se generan CO₂ y cenizas. Un nuevo proceso químico utiliza el dióxido de carbono generado durante la combustión y las cenizas resultantes de la combustión de residuos de destintado y para producir carga mineral reciclada para su uso en papel. El nuevo proceso es similar al de producción de carbonato de calcio precipitado puro (PCC).

El proceso de producción de RMF-PCC reduce significativamente los residuos de las plantas de destintado, reduce el consumo de combustibles fósiles con respecto al proceso de producir CaCO₃ a partir de CaO en un 50% y elimina parcial o totalmente las cenizas y las emisiones de CO₂ de la fábrica.

4.7.3. Residuos sólidos

El reciclado del papel, típicamente genera una cantidad significativa de residuos sólidos que deben ser manejados como tales o como material para la elaboración de productos derivados. Para ambas opciones, se han evaluado diversas alternativas con el fin de optimizar los sistemas de producción.

En principio, se puede dividirlos en tres tipos. Mediante métodos magnéticos, por decantación o centrifugación son separados los materiales no celulósicos presentes en el material que llega para su reciclado. Estos constituyen una fracción menor de los residuos sólidos (por debajo del 5% del material total), y está constituido por una mezcla de plásticos, cintas adhesivas, gomas, agregados, metales, vidrio y materiales textiles. Este material ha sido ensayado para la producción de placas obtenidas por presión para su uso en construcción, con muy buenas propiedades de resistencia mecánica y a la hidratación. También se obtiene una cantidad importante de barros, provenientes del funcionamiento de las plantas de tratamientos primarios o secundarios aplicados a los efluentes líquidos. Aunque los barros usualmente son dispuestos en vertederos sanitarios, los barros y las cenizas de estos barros han sido explorados como aditivos en la formulación de nuevos materiales para la construcción y la modificación de las propiedades del cemento



Portland, agregando hasta un 5% de este material residual. Esto da lugar a materiales más livianos, con mayor capacidad de absorción y retención de agua. Por otro lado, se ha explorado su uso en la formulación de mezclas para la elaboración de materiales cerámicos.

Pero en estos barros sin tratar, se encuentra presente una cantidad significativa de fibra corta de celulosa (FCC). Estas son las fibras que, al no mantener las características moleculares necesarias para incorporarse en la retícula del nuevo material en formación, en cada ciclo se pierde en los efluentes descartados. Se estima que hasta un 14% de la fibra de celulosa se pierde en los efluentes de fabricación del papel en cada ciclo y que cada fibra de celulosa puede reciclarse hasta un máximo de siete veces, antes de dañarse de tal manera que no pueda incorporarse al material elaborado.

Existen esfuerzos dirigidos a evaluar la posibilidad de revalorización del material sólido contenido en los efluentes del reciclado del papel. La búsqueda de productos derivados de esta FCC, aportaría en la minimización de los impactos ambientales y en la maximización de los beneficios ambientales de la fabricación de papel reciclado: al valorizar el residuo, disminuyen su volumen durante el proceso y al mismo tiempo disminuyen también los requerimientos de materia prima virgen.

Por un lado, la FCC puede utilizarse como fuente de carbono orgánico de calidad suficiente para dar lugar a productos de interés industrial. Se ha desarrollado la producción de etanol mediante sacarificación y fermentación simultáneas y secuencial sin suplementos, obteniéndose rendimientos de entre el 50 y el 70%.

Los derivados de la celulosa son variados y variadas también sus aplicaciones. Se han obtenido resultados preliminares a escala de laboratorio, para la síntesis de metil celulosa y carboximetil celulosa. Estos indicarían que se obtienen sustancias de peso molecular menor al de las obtenidas desde fuentes tradicionales

En general, es posible suponer que la recuperación de material de desecho (fibras cortas de celulosa) para la obtención de material de alto valor agregado (MC de bajo peso molecular), estaría fuertemente favorecida por un balance global que considerase los beneficios ambientales asociados a los eventuales beneficios económicos del procesamiento de los efluentes del reciclado de papel.



CAPÍTULO II

CÁLCULOS



ÍNDICE

1. Volumen del púlper	221
2. Espesor	223
2.1. Estudio de la distribución de presiones dentro del depósito	225
3. Rotor	232
4. Motor	234
5. Correas y poleas	236
6. Eje principal	243
7. Rodamientos	256
7.1. Lubricación	266

En el presente capítulo se realizará el diseño de un púlper vertical de baja consistencia, para desintegrar papel reciclado o papelote en una fábrica de papel. Este púlper servirá también para desintegrar otros tipos de pasta, como pastas vírgenes, solo cambiará el tiempo de desintegración y por lo tanto el flujo que será capaz de tratar.

1. Volumen del púlper

El volumen del púlper está influido por:

1. Flujo de pasta a tratar.
2. Modo de operar (continuo o discontinuo).
3. Tiempo de desintegración de la materia prima.

1. El flujo de pasta que tiene que tratar el púlper se debe conocer para realizar el diseño. Se supone que la fábrica procesa **250 toneladas al día de papel reciclado**, trabajando las 24 horas del día en 3 turnos de 8 horas cada uno, queda:

$$250 \frac{t}{\text{dia}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 10,417 \frac{t}{h}$$

El contenido en sólidos del púlper es de tan solo un 4%, siendo el resto agua, por lo que el volumen total de flujo másico que deberá tratar el púlper es:

$$\frac{10,417 \frac{t}{h}}{0,04} = 260,425 \frac{t}{h}$$

2. Debido a los altos consumos energéticos de estos equipos suelen trabajar de forma discontinua, el modo de operar es el siguiente, se llena de agua la cuba, se pone en marcha el agitador y se introduce la pasta hasta conseguir una concentración aproximada de 150 g/L. Por lo que en cada desintegración tendremos:

- Fase de carga o llenado del púlper.
- Fase de desintegración.
- Fase de descarga o vaciado del púlper.

3. El tiempo de desintegración de las diferentes materias primas son datos que conocen las fábricas de papel con la experiencia de los años, o se obtienen en plantas piloto a escala y posteriormente se realiza un análisis de semejanza para conocerlo a escala industrial. Por lo tanto, son datos que se encuentran tabulados.

Tabla II.1.1: Clasificación de la materia prima según su facilidad de desintegración

Tipo	Clasificación	Ejemplos
Tipo I	Fácil desintegración	Pastas húmedas, recorte de papel sin encolar, roturas de prensas, recortes de papel y cartón limpios de contaminantes (plásticos, cuerdas etc), papel de periódico.
Tipo II	Difícil desintegración	Papelote resistente en húmedo, papeles Kraft de alto gramaje, cartón ondulado.

El papelote en general requiere un tiempo de desintegración de entre 10 y 12 minutos. Para realizar el diseño se toma el valor más crítico, en este caso **12 minutos de tiempo de desintegración**, esto supone que en una hora se hacen 5 desintegraciones. La densidad de la pasta que alimenta al púlper es de 1090 kg/m³, como se ve es muy parecida a la del agua, ya que es casi toda agua.

Con estos datos se calcula el volumen que tendrá el púlper:

$$V_{Operativo} = 260,425 \frac{t}{h} * \frac{1}{5 \text{ desintegración}} * \frac{h}{1000} * \frac{kg}{t} * \frac{1 m^3}{1090 kg}$$

$$= 47,784 m^3$$

Se aplica un factor de seguridad del 20% para evitar que desborde el agua por los laterales durante la agitación, por lo que el volumen real del púlper es:

$$V_{Púlper} = V_{Operativo} * 1,2 = 47,784 m^3 * 1,2 = 57,341 m^3$$

En cuanto a la forma, tendrá una parte troncocónica para facilitar su vaciado y una parte cilíndrica, como vemos en la figura II.1.1.

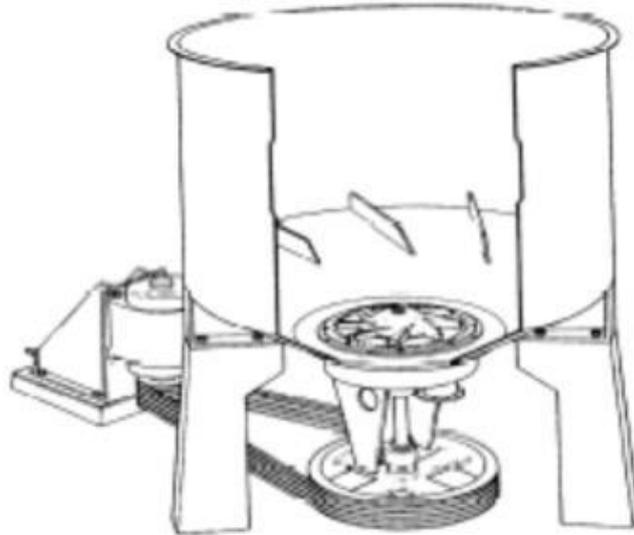


Figura II.1.1: Forma estructural del púlper

La parte troncocónica tiene un volumen de 10 m^3 :

- Radio menor = $0,5\text{m}$
- Altura = $2,145\text{m}$

La parte cilíndrica un volumen de $37,78\text{m}^3$:

- Radio = $1,815\text{m}$
- Altura = $3,637\text{m}$

2. Espesor

Para realizar el cálculo del espesor se debe elegir el material de construcción en primer lugar.

El material de construcción es **acero inoxidable F-3504** (nomenclatura según la norma UNE), ya que el púlper va a trabajar en un ambiente húmedo, este acero es el más utilizado industrialmente, es un acero austenítico de clase cromo-níquel con una alta ductilidad y una muy buena conformabilidad, además resiste la mayoría de los productos químicos y tiene una resistencia a la corrosión aceptable.

Para las zonas que estén en contacto con la pasta, no obstante, será necesario un acero más resistente a la corrosión, por lo que el acero anterior estará recubierto de una **chapa de acero inoxidable F-3533**, este acero es

más caro que el anterior y tiene características tanto mecánicas como de fabricación similares a las del acero F-3504, pero tiene una mejor resistencia a la corrosión, especialmente a ambientes marinos, algo muy deseable en este tipo de equipos.

En la siguiente tabla podemos ver la composición de los aceros utilizados:

Tabla II.2.1: Composición y principales características de los materiales utilizados

	F-3504	F-3533
%C	≤ 0,08	≤ 0,03
%Cr	18-20	16-18
%Fe	66.3-74	62,4-72
%Mn	≤ 0,02	≤ 0,02
%Mo	-	2-2,5
%Ni	8-10,5	10-14
%P	≤ 0,045	≤ 0,045
%S	≤ 0,03	≤ 0,03
%Si	≤ 1	≤ 1
Dureza (ensayo Roc. B)	70	79
Límite elástico	215MPa	290MPa
Límite de rotura	505MPa	560MPa
Elongación a rotura	70%	50%
Módulo de elasticidad	193-200 GPa	193GPa
Ensayo Charpy	325J	103J
Precio relativo	100%	125%

Una vez conocidas las propiedades del material se recurren a las tablas ASME para obtener las ecuaciones del cálculo del espesor:

$$t' = \frac{P * R_i}{2SE + 0,4P}$$

Dónde:

- t´ espesor mecánico (en pulgadas)
- P presión (en psi)
- R_i radio interno (en pulgadas)
- S tensión máxima admisible (en psi)
- E eficiencia de la soldadura

Para conocer la presión, se hará un estudio de la distribución de presiones dentro del depósito

2.1. Estudio de la distribución de presiones dentro del depósito

Para realizar el estudio de la distribución de presiones el método más exacto es el experimental, construyendo un púlper a escala de laboratorio y aplicando ecuaciones de semejanza para correlacionarlo con un púlper a escala industrial, ya que un flujo tan turbulento y no uniforme no es descrito correctamente mediante las ecuaciones teóricas.

Debido a la imposibilidad de llevar esto a cabo por el alto coste que tendría para la universidad, como primera aproximación se aplicarán las ecuaciones de fluidoestática. Para aplicar estas ecuaciones se deben cumplir 2 hipótesis:

- Fluido está en reposo (cogemos un sistema de referencia solidario al movimiento del fluido).
- Las fuerzas másicas derivan de un potencial. $F_m = -\nabla U$

Se parte de la **ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para una partícula fluida**:

$$\rho * \frac{dv}{dt} = \rho * F_m + div \chi$$

La velocidad del fluido es nula (se coge un sistema de referencia solidario a él, no se mueve respecto del sistema de referencia), por tanto, el primer término de la ecuación se hace nulo, quedando la **ecuación fundamental de la fluidoestática**:

$$\rho * F_m + div \chi = 0$$

Dónde:

$$\chi = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix}$$

Por lo que:

$$div \chi = -\nabla P$$

Se sustituye en la ecuación fundamental de la fluidoestática y queda la **ecuación de equilibrio entre las resultantes de las fuerzas de volumen y las fuerzas de superficie (de compresión) para un fluido en reposo**:

$$\rho * F_m - \nabla P = 0$$

Se sustituye en la ecuación las fuerzas másicas: $F_m = -\nabla U$ (hipótesis de fluidoestática).

$$-\rho * \nabla U - \nabla P = 0$$

Si se toman elementos diferenciales y se despeja la densidad, queda la **ecuación de equilibrio mecánico que se debe de cumplir para que el fluido esté en reposo:**

$$-\rho = \frac{dP}{dU}$$

Lo siguiente es estudiar la forma de las superficies equipotenciales del fluido dentro del púlper, para ello se sabe que actúa la fuerza de la gravedad y el rotor está imprimiendo un giro al fluido, por lo que la energía potencial (U) será la combinación de ambas fuerzas:

$$U = g * z - \frac{\Omega^2 * r^2}{2}$$

Se deriva la energía potencial y queda:

$$dU = g * dz - \Omega^2 * r * dr$$

Como la energía potencial es constante, su derivada es cero ($dU = 0$), quedando:

$$g * dz - \Omega^2 * r * dr = 0 \rightarrow dz = \frac{\Omega^2 * r}{g} dr$$

Integrando la ecuación:

$$\int dz = \int \frac{\Omega^2 * r}{g} dr \rightarrow z = \frac{\Omega^2 * r^2}{2g} + K$$

Donde K es la constante de integración, ya que es una integral indefinida. Esta ecuación se corresponde con la ecuación de una parábola, por lo tanto, las superficies equipotenciales serán parábolas.

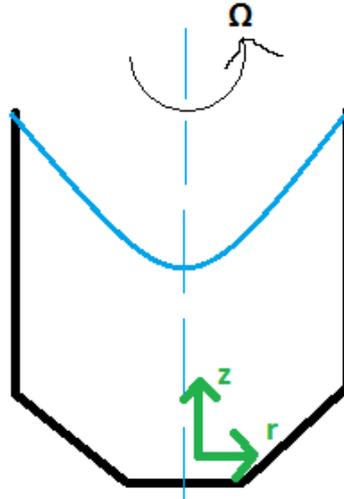


Figura II.2.1: Esquema de la superficie libre del fluido debido a la energía potencial del mismo.

Sabiendo esto, se saca la distribución de presiones, al igual que antes, se parte de la energía potencial y la se deriva:

$$U = g * z - \frac{\Omega^2 * r^2}{2}$$

$$dU = g * dz - \Omega^2 * r * dr$$

Se sustituye la ecuación de equilibrio mecánico que se debe de cumplir para que el fluido esté en reposo demostrada anteriormente:

$$-\rho = \frac{dP}{dU} \rightarrow dU = \frac{dP}{-\rho}$$

En la derivada de la energía potencial, queda:

$$\frac{dP}{-\rho} = g * dz - \Omega^2 * r * dr \rightarrow dP = -\rho * (g * dz - \Omega^2 * r * dr)$$

Se integra la ecuación suponiendo la densidad del fluido constante:

$$\int_{P_0}^P dP = \int_{z_0}^z \int_{r_0}^r -\rho * (g * dz - \Omega^2 * r * dr)$$

$$P - P_0 = -\rho * g * (z - z_0) - \rho * \Omega^2 \frac{r^2 - r_0^2}{2}$$

Finalmente, la distribución de presiones genérica en el púlper es la siguiente:

$$P = P_0 - \rho * g * (z - z_0) + \rho * \Omega^2 \frac{r^2 - r_0^2}{2}$$

Por la forma de las superficies equipotenciales (parábolas), los puntos de mayor presión serán en el fondo del depósito en los extremos, para calcular la presión en esos puntos más críticos, se necesita conocer la presión en un punto del depósito para sustituirla en la ecuación de distribución de presiones. Se elige el punto "A" situado en $r_0=0$ y $z_0=K$. Este punto se encuentra en la superficie libre del fluido por lo tanto su presión es la presión atmosférica ya que el depósito está abierto al ambiente.

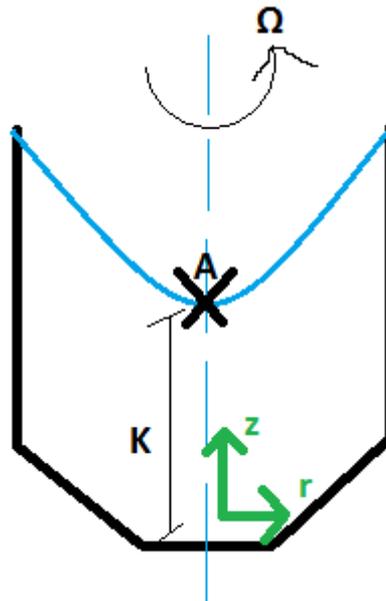


Figura II.2.2: Esquema de la superficie libre del fluido que muestra el punto A elegido, a una distancia K del origen de coordenadas del sistema de referencia.

La distribución de presiones en función del punto A queda:

$$P = P_{atm} - \rho * g * (z - K) + \rho * \Omega^2 \frac{r^2}{2}$$

Se necesita conocer el valor de K, para ello se sabe que el volumen es igual al área por la altura, o lo que es lo mismo:

$$V = \int z * dA$$

Se sustituye el valor de z calculado anteriormente, y se deriva el área del círculo, quedando:

$$V = \int_0^R \left(\frac{\Omega^2 * r^2}{2g} + K \right) * 2\pi r dr$$

El volumen de fluido es $47,784\text{m}^3$ y para evitar que “ r ” sea variable, se dividirá el púlper en dos secciones, por un lado, la sección inferior en forma de tronco de cono, y por otro lado la sección cilíndrica.

Se empleará solamente la sección cilíndrica (de radio constante), para el cálculo de K' , para ello se toma un nuevo sistema de referencia situado en $r=0$ y $z=2,145\text{m}$, es decir, en el eje de rotación y en el inicio de la parte cilíndrica del depósito. Esta parte cilíndrica tiene un volumen de fluido de $37,78\text{m}^3$ como se ha visto en el apartado 1.

Se integra la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} V &= \int_0^R \left(\frac{\Omega^2 * r^2}{2g} + K' \right) * 2\pi r dr \\ &= \int_0^R \frac{2\Omega^2 * r^3}{2g} dr \\ &+ \int_0^R 2\pi * K' * r * dr = \frac{\pi * \Omega^2 * R^4}{4g} + \frac{2\pi * K' * R^2}{2} \end{aligned}$$

Se despeja el valor de K de la ecuación y se sustituyen los valores (la velocidad de giro es de 330rpm que será calculada en el siguiente apartado):

$$K' = \frac{V - \frac{\pi * \Omega^2 * R^4}{4g}}{\pi * R^2} = \frac{37,78\text{m}^3 - \frac{\pi * \left(330 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ min}} * \frac{1}{60 \text{ s}} \right)^2 * 1,815^4}{4 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}{\pi * 1,815^2} = 1,966\text{m}$$

Con este valor sacamos el valor de K respecto del sistema de referencia global usado hasta ahora:

$$K = K' + 2,145\text{m} = 1,966\text{m} + 2,145\text{m} = 4,111\text{m}$$

Finalmente, la distribución de presiones en el depósito queda:

$$\begin{aligned}
 P &= P_{atm} - \rho * g * (z - K) + \rho * \Omega^2 \frac{r^2}{2} \\
 &= 101.325 \text{ Pa} - 1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (z - 4,111) + 1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\
 &\quad * \left(330 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ radián } 1 \text{ min}}{\text{rev } 60 \text{ s}} \right)^2 * \frac{r^2}{2}
 \end{aligned}$$

Con esta distribución se calcula la presión en los puntos más críticos del depósito, que como se ha dicho antes, es el fondo en los extremos, sin embargo, como el depósito tiene un diseño troncocónico, puede haber dos puntos críticos, tal como se ve en la figura II.2.3:

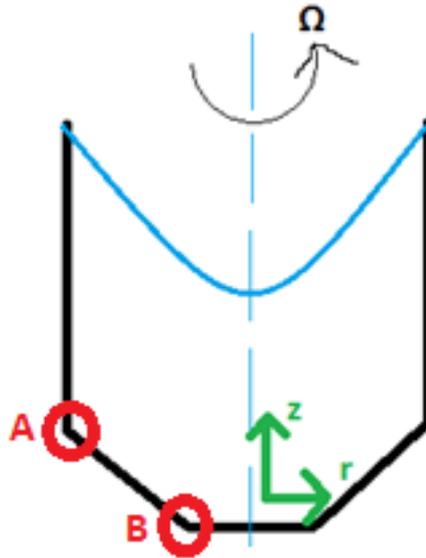


Figura II.2.3: Puntos de máxima presión en el depósito

Se calcula la presión en los dos puntos para ver la más crítica:

- Punto A:

$$\begin{aligned}
 P_A &= 101.325 \text{ Pa} - 1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (2,145\text{m} - 4,111\text{m}) + 1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\
 &\quad * \left(330 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ radián } 1 \text{ min}}{\text{rev } 60 \text{ s}} \right)^2 * \frac{1,815^2}{2} = 1.894.749 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

- Punto B:

$$\begin{aligned}
 P_B &= 101.325 \text{ Pa} - 1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0\text{m} - 4,111\text{m}) \\
 &\quad + 1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(330 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ radián } 1 \text{ min}}{\text{rev } 60 \text{ s}} \right)^2 * \frac{0,5^2}{2} \\
 &= 279.792 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Como se ve, es mucho más crítico el punto A debido al aumento del radio a pesar de la disminución de la altura, esto se debe a que influye mucho más el valor de la velocidad angular que la gravedad en el aumento de la presión.

En este valor de presión viene incluida la presión atmosférica, debemos restársela para aplicar las normas ASME, ya que también actúa por la cara exterior del depósito, anulándose.

$$\begin{aligned}
 P &= 1.894.749 \text{ Pa} - P_{atm} = 1.894.749\text{Pa} - 101.325\text{Pa} = 1.793.424 \text{ Pa} \\
 &= 260,11 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

El radio interno es de 1,815m que en pulgadas son 37,4in, la tensión máxima admisible del acero elegido es 1.600 psi y la eficiencia de la soldadura se supone de 0,7 ya que se desconfía del fabricante como medida preventiva. Con todo ello se obtiene un espesor mecánico de:

$$t = \frac{P * R_i}{2SE + 0,4P} = \frac{260,11 \text{ psi} * 71,46 \text{ in}}{2 * 1600 \text{ psi} * 0,7 + 0,4 * 260,11 \text{ psi}} = 7,93 \text{ in} = 0,2\text{m}$$

Al espesor mecánico hay que añadirle un sobre espesor por corrosión y a todo ello se le multiplicará por un factor de tolerancia de fabricación M, según la ecuación:

$$t = (t' + c) * M$$

Dónde:

- t espesor teniendo en cuenta el sobre espesor por corrosión por tolerancia de fabricación (mm).

- t' espesor mecánico (mm).
- c sobre espesor por corrosión (mm).
- M valor de la tolerancia de fabricación.

Para calcular el sobre espesor por corrosión se supone un tiempo de vida del púlper de 20 años, y una corrosión de 0,05mm/año, de forma que:

$$c = \text{tiempo de vida} * \frac{\text{corrosión}}{\text{año}} = 20 \text{ años} * \frac{0,1 \text{ mm}}{\text{año}} = 2 \text{ mm}$$

Para M se coge el valor típico de 1,125 (un 12,5%), de forma que queda:

$$t = (t' + c) * M = (200\text{mm} + 2\text{mm}) * 1,125 = 227,25 \text{ mm} = 0,227\text{m}$$

El depósito se sujeta por 3 patas formando un ángulo de 120° entre ellas, soldadas al cuerpo del depósito y a unas placas de sección cuadrada que están ancladas al suelo para proporcionar una superficie más amplia de contacto. Estas patas son también de acero F-3504 y se reparten el peso del púlper más las 50 toneladas de peso cuando está cargado.

Además, el depósito contará con 8 aletas deflectoras laterales, una cada 45°, para evitar conseguir una mejor homogeneización y evitar el flujo circulatorio del fluido, entre otras disposiciones. Estas placas tendrán 36cm de largo, una décima parte del diámetro total del tanque, y estarán construidas igualmente de acero inoxidable F-3533.

3. Rotor

Se calcula la potencia útil de nuestro púlper, en este caso también se ve influenciada por la materia prima utilizada en el púlper. Para un papelote de recortes limpio y sin cortar, el consumo oscila entre 10 y 15 kWh/t. Tomando un valor medio y teniendo en cuenta el papelote que se procesa en el púlper se obtiene la potencia útil.

$$P_u = 12,5 \frac{\text{kW} * \text{h}}{\text{t}} * 10,417 \frac{\text{t}}{\text{h}} = \mathbf{130 \text{ kW}}$$

La potencia instalada es de 160kW y el diámetro del rotor es de 1m, y con una velocidad de giro de 330 rpm, lo que supone una velocidad lineal de:

$$330 \frac{rev}{min} * \frac{2\pi \text{ radián}}{rev} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * 1 \text{ m} = 34,56 \frac{m}{s}$$



Figura II.3.1: Agitador para baja consistencia empleado

Como se ve en la figura II.3.2, para una consistencia inferior al 6% y un tiempo de agitación de 12 minutos la desfibrilación que se consigue practicamente es del 100%.

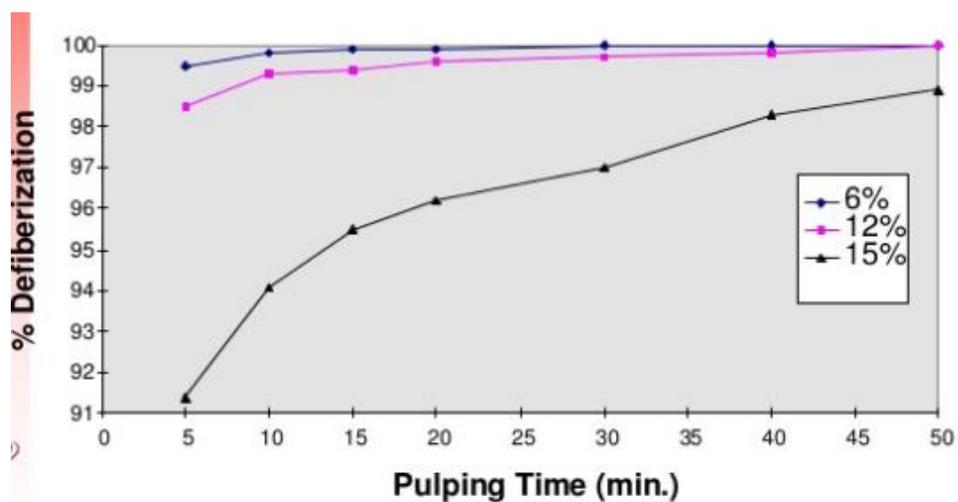


Figura II.3.2: Representación de la desfibrilación obtenida en función del tiempo de pulpeo para diferentes consistencias.



En cuanto al material del rotor, se ha elegido **acero F-3309**, es un acero inoxidable austenoferrítico, con mejores características mecánicas que los aceros usados para la construcción de la cuba, ya que el agitador es la parte que más sufre del equipo. El precio de este acero es un 50% superior al F-3504 usado para el recipiente.

4. Motor

Para la elección del motor se emplea el catálogo general de motores trifásicos MEB S.A. Descartamos la gama de motores de 2 y 4 polos, ya que dan una velocidad de rotación muy superior a la requerida y la relación de reducción sería demasiado grande. Nos fijamos en la gama de motores de 6 polos, que dan una velocidad de rotación cercana a 1000 rpm para una potencia instalada de 160kW.

Tabla II.4.1: Motores de 6 polos (1000 RPM/50Hz, 1200 RPM/60Hz) 400V, catálogo general motores trifásicos MEB SA

	POTENCIA		RPM	A	Eff %	Cosφ	Par Arr/Par Nom	Corr Arr/Corr Nom	Par Máx/Par Nom	Nivel SonoroLwdB(A)	Peso kg
	KW	CV									
TA711-6	0,18	0,25	910	0,7	56,0	0,66	2,0	4,0	1,9	51	7,7
TA712-6	0,25	0,34	915	0,9	59,0	0,68	2,0	4,0	1,9	52	7,9
TA801-6	0,37	0,50	920	1,17	62,0	0,70	2,0	4,7	1,9	53	12,0
TA802-6	0,55	0,75	920	1,6	65,0	0,72	2,1	4,7	1,9	55	13,0
MA90S-6	0,75	1,0	930	2,0	75,9	0,72	2,1	5,8	2,1	57	17,1
MA90L-6	1,1	1,5	930	2,8	78,1	0,73	2,1	5,9	2,1	57	18,8
MA100L1-6	1,5	2,0	930	3,7	79,8	0,74	2,1	6,0	2,1	61	25,3
MA100L2-6	2,2	3,0	945	5,2	81,8	0,74	2,1	6,0	2,1	65	31,0
MA132S-6	3	4,0	960	7,1	83,3	0,74	2,0	6,2	2,1	69	58,0
MA132M1-6	4	5,5	965	9,2	84,6	0,74	2,0	6,8	2,1	69	60,2
MA132M2-6	5,5	7,5	965	12,3	86,0	0,75	2	7,1	2,1	69	103
MG160M-6	7,5	10	970	15,9	87,2	0,78	2,1	6,7	2,1	73	105
MG160L-6	11	15	970	22,7	88,7	0,79	2,1	6,9	2,1	73	133
MG180L-6	15	20	980	29,8	89,7	0,81	2,0	7,2	2,1	73	175
MG200L1-6	18,5	25	980	36,5	90,4	0,81	2,1	7,2	2,1	73	190
MG200L2-6	22	30	980	42,6	90,9	0,82	2,1	7,3	2,1	73	220
MG225M-6	30	40	980	57,6	91,7	0,82	2,0	7,1	2,1	74	252
MG250M-6	37	50	980	69,0	92,2	0,84	2,1	7,1	2,1	76	358
MG280S-6	45	60	980	81,0	92,7	0,86	2,1	7,2	2,0	78	466
MG280M-6	55	75	980	99,0	93,1	0,86	2,1	7,2	2,0	78	525
MG315S-6	75	100	990	134	93,7	0,86	2,0	6,7	2,0	83	900
MG315M-6	90	125	990	161	94,0	0,86	2,0	6,7	2,0	83	990
MG315L1-6	110	150	990	196	94,3	0,86	2,0	6,7	2,0	83	1060
MG315L2-6	132	180	990	234	94,6	0,86	2,0	6,7	2,0	83	1120
MG355M1-6	160	220	990	280	94,8	0,87	2,0	6,7	2,0	85	1596
MG355M2-6	200	270	990	349	95,0	0,87	2,0	6,7	2,0	85	1920
MG355L-6	250	340	990	437	95,0	0,87	2,0	6,7	2,0	85	2765

El motor que elegimos es el **MG355M1-6**. Este motor gira a 990 rpm y el rotor a 330rpm, por lo que su relación de reducción será de 3, una relación de reducción perfectamente alcanzable para la transmisión por correas que se elige en el apartado 5.

5. Correas y poleas

Se ha elegido un sistema de transmisión por correas debido a que la potencia es pequeña y no llega a las necesidades de poner un reductor de velocidad. Un sistema de engranajes sería preferible si se quisiera asegurar perfectamente la velocidad del rotor, pero en un púlper se pueden permitir pequeñas variaciones y aceptar el deslizamiento funcional de la correa (1-2%).

Otras ventajas que presentan las correas es su reducido mantenimiento, el hecho de que no requieren lubricación, su funcionamiento silencioso y su capacidad de absorber choques y vibraciones.

Además, las correas utilizadas serán planas, ya que las trapezoidales complicarían innecesariamente el diseño de la máquina.

El motor elegido tiene las siguientes características:

- $P_N = 160\text{kW}$
- $P = 130\text{ kW}$
- $\omega = 990\text{ rpm}$

La velocidad del motor en unidades del sistema internacional es la siguiente:

$$990 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2 \pi}{1 \text{ rev}} = 103,67 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Sabiendo la potencia que tiene que realizar el motor, suponemos un rendimiento de 0,95 por correa, por lo que la potencia suministrada por el motor eléctrico (P') será:

$$P' = \frac{130\text{kW}}{0,95} = 136,84 \text{ kW}$$

Calculamos el par que realiza el motor:

$$T = \frac{P'}{\omega} = \frac{136,84\text{kW} * \frac{1000\text{W}}{1\text{kW}}}{103,67 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 1319,96 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Se requiere una relación de transmisión de reducción de 3, ya que la velocidad de giro de nuestro eje es de 330 rpm.

Para dimensionar las correas utilizaremos el método suministrado por el fabricante Dunlop.

El primer paso es calcular la potencia corregida (P_c), que depende del tipo de uso y las horas de uso, de acuerdo a la exigencia y el desgaste de las correas en la transmisión, como se puede ver en la tabla II.5.1:

Tabla II.5.1: Coeficiente de corrección de potencia en poleas

Tabla Nº 3 - Coeficiente de corrección de la potencia						
Tipo de máquina conductora Tipo de máquina conducida	Motores de corriente alterna, torque normal, a jaula de ardilla, sincrónicos; fase partida. Motores de corriente continua, bobinado en shunt. Máquinas de combustión interna, cilindros múltiples.			Motores de corriente alterna, alto torque, alto deslizamiento, bobinado en serie y anillado colector. Motores de corriente continua, bobinado en serie y bobinado compound. Máquina a combustión interna, monocilíndrica. Ejes en línea. Arranque directo y con embrague		
	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias
Agitador para líquidos y semilíquidos, ventiladores y aspiradores, compresores y bombas centrífugas. Sopladores hasta 10 HP. Transportadores livianos.	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Cintas transportadoras para arena, granos, etc. Mezcladores de panadería. Sopladores de más de 10 HP, generadores. Línea a ejes (ejes principales), máquinas de lavaderos, máquinas herramienta, punzadoras, prensa, guillotinas, bombas rotativas positivas. Máquinas de imprenta, zarandas vibradoras y giratorias.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Máquina de ladrillos y cerámicas, elevadores a cangilones. Generadores y excitatrices. Compresores a pistón, transportadores, molinos a martillos, molinos batidores para papel, bombas a pistón, sopladores positivos. Pulverizadores, desmenuzadoras, sierras y máquinas para elaboración de madera, máquinas textiles.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Trituradoras (giratorias, mandíbulas, bolas). Molinos (bolas, laminadores, barras). Calamandra para goma, bambury-extrusoras.	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8

Se tiene un rotor para líquidos con un servicio continuo de mas de 16h, el factor de corrección F_c es de 1,3 y la potencia corregida (P_c) es:

$$P_c = 130kW * 1,3 = 169kW$$

Con estos valores se utiliza la figura II.5.1 para ver que tipo de correa se tiene.

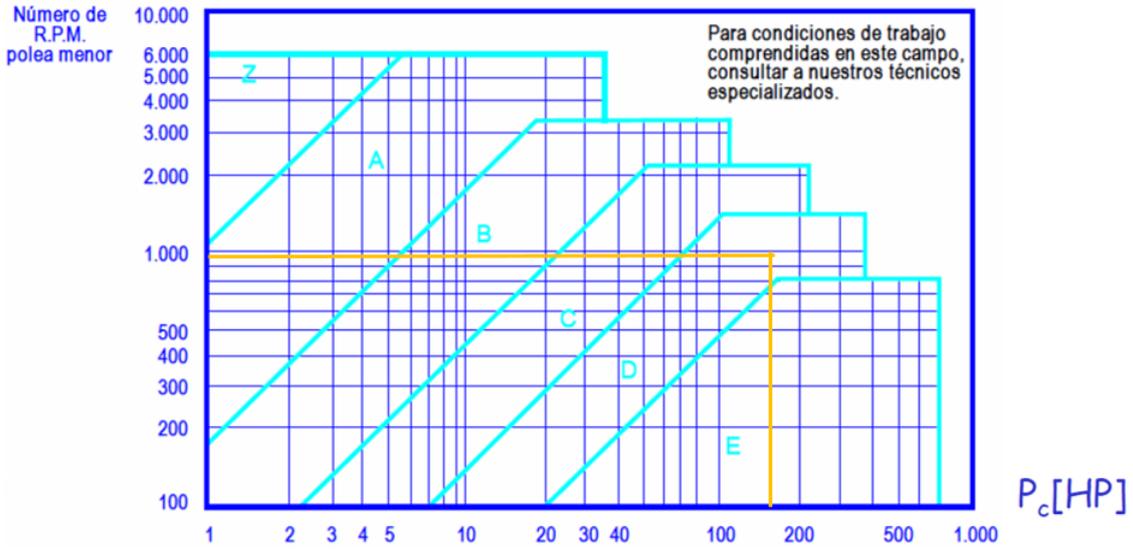


Figura II.5.1: Tipo de polea en función de la velocidad de giro y la potencia corregida

En el eje de ordenadas se entra con un valor de 990 rpm ya que la polea menor gira a la velocidad del motor, y en el eje de abcisas se entra con un valor de potencia de 214,56 HP (160kW). Sale una polea de tipo D.

Para ver el diámetro de las poleas se tiene en cuenta la figura II.5.2:

ø mm	Z	A	B	C	D	E	ø mm	Z	A	B	C	D	E
50							315	••	••	••			
53							355			•	•	•	••
56							375			•	•	•	
60	•						400	••	••	••	••		
63	••						425					•	
67	•						450	•	•	•	•	••	
71	••						475					•	
75	•						500	••	••	••	••	••	
80	••						530						•
90	•	••					560	•	•	•	•	•	••
95		•					600			•	•	•	•
100	••	••					630	••	••	••	••	••	••
106		•					670						•
112	•	••					710	•	•	•	•	•	••
118		•					750			•	•	•	
125	••	••	•				800		••	••	••	••	••
132		•	•				900		•	•	•	•	•
140	•	••	••				1000		••	••	••	••	••
150	•	•	•				1060					•	
160	••	••	••				1120			•	•	•	
170			•				1250			••	••	••	
180	•	••	••				1400			•	•	•	
200	••	••	••	••			1500				•	•	
212				•			1600			••	••	••	
224	•	•	•	••			1800				•	•	•
236				•			1900						•
250	•	••	••	••			2000				••	••	
265				•			2240						••
280		•	•	••			2500						••
300			•	•	•								

Figura II.5.2: Diámetro primitivo de las poleas en función del tipo de polea

Por recomendación del fabricante, sabiendo el tipo de polea, teniendo en cuenta la relación de reducción, y la geometría del dispositivo, seleccionamos un diámetro de la polea menor ($d = 0,4m$).

Por lo que el diámetro de la polea mayor (D) mayor será:

$$D = d * n = 0,4m * 3 = 1,2m$$

Se pasa ahora a definir la longitud primitiva de la correa.

Se considera una distancia entre ejes de dos veces la suma de ambos diámetros, es decir, 3,2m.

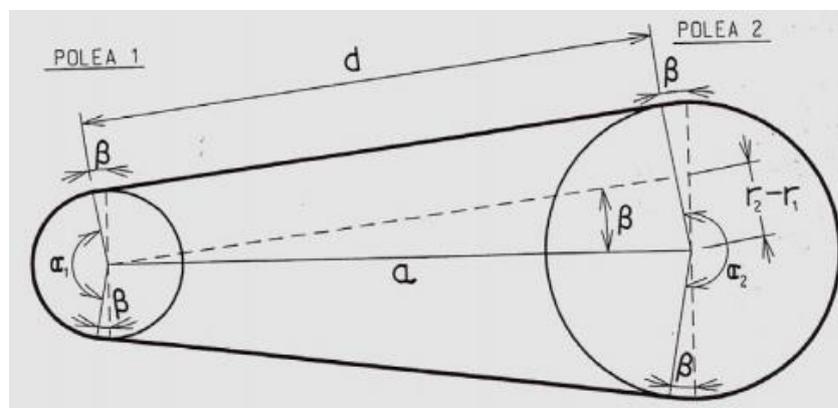


Figura II.5.3: Esquema de un sistema de poleas y correas con los parámetros característicos

Se tiene un valor de a de 2m:

Se calcula β :

$$\text{sen } \beta \approx \beta = \frac{r_2 - r_1}{a} = \frac{0,6m - 0,2m}{3,2m} = 0,125 \text{ rad} = 7,2^\circ$$

Con ello se pasa a calcular los ángulos abrazados sobre las poleas:

$$\alpha_1 = \pi - 2\beta = 180^\circ - 2 * 7,2^\circ = 165,6^\circ$$

$$\alpha_2 = \pi + 2\beta = 180^\circ + 2 * 7,2^\circ = 194,4^\circ$$

También se puede calcular la longitud d :

$$d = a * \cos \beta = 2m * \cos 7,2 = 3,175m$$

Con estos datos se calcula la longitud primitiva (L_p):

$$\begin{aligned} L_p &= r_1 * \alpha_1 + 2d + r_2 * \alpha_2 \\ &= 2,89rad * 0,2m + 2 * 3,175m + 0,6m * 3,39rad = 8,962m \\ &= 353 \text{ in} \end{aligned}$$

A continuación, se calculan los factores de corrección de la potencia que es capaz de transmitir el sistema de correas.

- Factor de corrección por longitud (F_{cl}):

Tabla II.5.2: Factor de corrección por longitud de correa

Longitud correa	Z	A	B	C	D	E
195	-	-	1.18	1.07	0.96	0.92
210	-	-	1.19	1.08	0.98	0.94
240	-	-	1.22	1.11	1.00	0.96
270	-	-	1.25	1.14	1.03	0.99
300	-	-	1.27	1.16	1.05	1.01
330	-	-	-	1.19	1.07	1.03
360	-	-	-	1.21	1.09	1.05

Se coge un valor de $F_{cl} = 1,08$, ya que está entre las longitudes de 330 ($F_{cl} = 1,07$) y 360 ($F_{cl} = 1,09$).

- Factor de corrección de ángulo abrazado (F_c):

Tabla II.5.3: Factor de corrección de ángulo abrazado

Arco de contacto sobre polea menor	Poleas acanaladas	Poleas acanalada/plana
180°	1.00	0.75
175°	0.99	0.76
170°	0.98	0.77
167°	0.97	0.78
164°	0.96	0.79
160°	0.95	0.80
157°	0.94	0.81
154°	0.93	0.81
150°	0.92	0.82
147°	0.91	0.83
144°	0.90	0.83
140°	0.89	0.84
137°	0.88	0.85
134°	0.87	0.85
130°	0.86	0.86

Se elige una polea acanalada por lo que el valor de F_c es 0,965.

Se comprueba que la velocidad de la correa es inferior a 30 m/s:

$$\omega_1 * r_1 = 103,67 \frac{rad}{s} * 0,2m = 20,734 \frac{m}{s}$$

$$\omega_2 * r_2 = 34,55 \frac{rad}{s} * 0,6m = 20,734 \frac{m}{s}$$

Se calcula la potencia base para un ángulo abrazado de 180° y la potencia adicional por relación de transmisión:

Tabla II.5.4: Potencia Base y Potencia Adicional

Tabla Nº 2 - Sección D		Prestación Base (en HP)																		Prestación adicional por relación de transmisión (en HP)																
R.P.M. de la polea menor	Diámetro primitivo de la polea menor (mm)																																			
		305	317	330	343	356	368	381	394	406	419	432	444	457	470	483	495	508	521	533	546	559	571	584	597	610	1.00 al	1.02 al	1.05 al	1.09 al	1.13 al	1.19 al	1.25 al	1.35 al	1.52 al	2.00 al
990	400	12.20	13.60	14.90	16.20	17.50	18.70	20.00	21.30	22.40	23.60	24.80	26.00	27.10	28.30	29.40	30.50	31.60	32.70	33.70	34.70	35.70	36.70	37.70	38.70	39.60	0.00	0.33	0.67	1.00	1.33	1.67	2.00	2.33	2.67	3.00
870	400	13.80	15.40	16.90	18.40	19.90	21.30	22.70	24.10	25.50	26.80	28.10	29.40	28.30	31.80	33.00	34.20	35.30	36.40	37.40	38.40	39.40	40.30	41.20	42.10	42.90	0.00	0.42	0.84	1.26	1.68	2.10	2.52	2.94	3.37	3.79
1160	400	15.00	16.80	18.50	20.20	21.80	23.30	24.80	26.30	27.60	28.90	30.20	31.40	32.50	33.50	34.50	35.40	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.56	1.12	1.68	2.24	2.81	3.36	3.93	4.49	5.05	
100	400	2.94	3.19	3.44	3.68	3.93	4.17	4.42	4.65	4.90	5.14	5.39	5.62	5.86	6.10	6.34	6.57	6.81	7.05	7.28	7.52	7.75	7.98	8.22	8.45	8.68	0.00	0.05	0.10	0.14	0.19	0.24	0.29	0.34	0.39	0.44
150	400	4.06	4.41	4.77	5.13	5.48	5.83	6.18	6.53	6.88	7.32	7.57	7.92	8.26	8.61	8.95	9.29	9.63	9.97	10.30	10.60	11.00	11.30	11.70	12.00	12.30	0.00	0.07	0.15	0.22	0.29	0.36	0.44	0.51	0.59	0.65
200	400	5.08	5.54	6.00	6.46	6.92	7.37	7.83	8.28	8.73	9.18	9.63	10.10	10.50	11.00	11.40	11.80	12.30	12.70	13.20	13.60	14.00	14.50	14.90	15.30	15.70	0.00	0.10	0.19	0.29	0.39	0.48	0.58	0.68	0.77	0.87
250	400	6.03	6.59	7.15	7.71	8.27	8.83	9.38	9.93	10.50	11.00	11.60	12.10	12.70	13.20	13.70	14.30	14.80	15.30	15.90	16.40	16.90	17.40	18.00	18.50	19.00	0.00	0.12	0.24	0.36	0.48	0.60	0.73	0.85	0.97	1.09
300	400	6.92	7.58	8.24	8.90	9.55	10.20	10.90	11.60	12.10	12.80	13.40	14.10	14.70	15.30	15.90	16.60	17.20	17.80	18.40	19.00	19.60	20.30	20.90	21.50	22.10	0.00	0.15	0.29	0.43	0.58	0.73	0.87	1.02	1.16	1.31
350	400	7.75	8.51	9.27	10.00	10.80	11.50	12.30	13.00	13.70	14.50	15.20	15.90	16.60	17.30	18.10	18.80	19.50	20.20	20.90	21.60	22.20	22.90	23.60	24.30	25.00	0.00	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	1.02	1.18	1.35	1.52
400	400	8.54	9.39	10.20	11.10	11.90	12.80	13.60	14.40	15.20	16.00	16.90	17.70	18.50	19.30	20.00	20.80	21.60	22.40	23.20	23.90	24.70	25.50	26.20	27.00	27.70	0.00	0.19	0.39	0.58	0.77	0.97	1.16	1.35	1.55	1.74
450	400	9.28	10.20	11.20	12.10	13.00	13.90	14.90	15.80	16.70	17.60	18.40	19.30	20.20	21.10	21.90	22.80	23.60	24.50	25.30	26.20	27.00	27.80	28.60	29.40	30.20	0.00	0.22	0.44	0.65	0.87	1.09	1.31	1.52	1.74	1.96
500	400	9.98	11.00	12.00	13.00	14.10	15.10	16.00	17.00	18.00	19.00	19.90	20.90	21.80	22.80	23.70	24.60	25.50	26.50	27.40	28.30	29.10	30.00	30.90	31.70	32.60	0.00	0.24	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	1.69	1.93	2.18
550	400	10.60	11.80	12.90	13.90	15.00	16.10	17.20	18.30	19.30	20.30	21.40	22.40	23.40	24.40	25.40	26.40	27.30	28.30	29.30	30.20	31.10	32.00	33.00	33.90	34.70	0.00	0.27	0.53	0.80	1.06	1.33	1.60	1.86	2.13	2.39
600	400	11.30	12.40	13.60	14.80	16.00	17.10	18.20	19.30	20.50	21.60	22.70	23.80	24.80	25.90	26.90	28.00	29.00	30.00	31.00	32.00	32.90	33.90	34.80	35.80	36.70	0.00	0.29	0.58	0.87	1.16	1.45	1.74	2.03	2.32	2.61
650	400	11.80	13.10	14.30	15.60	16.80	18.00	19.20	20.40	21.60	22.80	23.90	25.00	26.20	27.30	28.40	29.40	30.50	31.50	32.60	33.60	34.60	35.60	36.50	37.50	38.40	0.00	0.31	0.63	0.94	1.26	1.57	1.89	2.20	2.51	2.83
700	400	12.30	13.70	15.00	16.30	17.60	18.90	20.20	21.50	22.80	23.80	25.00	26.20	27.40	28.50	29.70	30.80	31.80	32.90	34.00	35.00	36.00	37.00	38.00	38.90	39.90	0.00	0.34	0.68	1.01	1.35	1.69	2.03	2.37	2.71	3.05
750	400	12.80	14.20	15.60	17.00	18.40	19.70	21.00	22.30	23.60	24.80	26.10	27.30	28.50	29.70	30.80	31.90	33.10	34.10	35.20	36.20	37.30	38.30	39.20	40.20	41.10	0.00	0.36	0.73	1.09	1.45	1.81	2.18	2.54	2.90	3.26
800	400	13.30	14.70	16.20	17.60	19.00	20.40	21.80	23.10	24.40	25.70	27.00	28.20	29.50	30.70	31.80	33.00	34.10	35.20	36.30	37.30	38.30	39.30	40.20	41.20	42.00	0.00	0.39	0.77	1.16	1.55	1.93	2.32	2.71	3.09	3.48
850	400	13.70	15.20	16.70	18.20	19.60	21.10	22.50	23.90	25.20	26.50	27.80	29.10	30.30	31.50	32.70	33.98	35.00	36.10	37.10	38.10	39.10	40.10	41.00	41.90	42.70	0.00	0.41	0.82	1.23	1.64	2.06	2.47	2.88	3.29	3.70
900	400	14.00	15.60	17.10	18.70	20.20	21.80	23.30	24.80	26.30	27.70	29.10	30.50	31.90	33.20	34.50	35.80	37.00	38.20	39.30	40.40	41.50	42.50	43.50	44.50	0.00	0.44	0.87	1.30	1.74	2.16	2.61	3.03	3.48	3.92	
950	400	14.30	15.90	17.50	19.10	20.60	22.10	23.60	25.10	26.40	27.80	29.10	30.40	31.60	32.80	34.00	35.10	36.20	37.30	38.30	39.30	40.40	41.50	42.50	43.50	0.00	0.46	0.92	1.38	1.84	2.30	2.76	3.24	3.67	4.13	
1000	400	14.60	16.20	17.90	19.50	21.00	22.60	24.00	25.50	26.90	28.30	29.60	30.80	32.10	33.30	34.40	35.50	36.50	37.50	38.50	39.30	40.20	41.00	41.70	42.40	43.00	0.00	0.48	0.97	1.45	1.93	2.42	2.90	3.38	3.87	4.35
1050	400	14.80	16.50	18.10	19.80	21.40	22.90	24.40	25.80	27.20	28.60	29.90	31.20	32.40	33.50	34.60	35.70	36.80	37.60	38.50	39.30	40.00	40.70	41.30	41.90	0.00	0.51	1.02	1.52	2.03	2.54	3.05	3.55	4.06	4.57	
1100	400	14.90	16.70	18.40	20.00	21.60	23.20	24.70	26.10	27.50	28.80	30.10	31.30	32.50	33.60	34.70	35.70	36.60	37.40	38.20	38.90	39.60	40.20	-	-	0.00	0.53	1.07	1.59	2.13	2.66	3.19	3.72	4.25	4.79	
1150	400	15.00	16.80	18.50	20.20	21.80	23.20	24.80	26.20	27.60	28.90	30.20	31.40	32.50	33.50	34.50	35.40	36.30	37.00	37.70	38.30	-	-	-	-	0.00	0.56	1.11	1.67	2.22	2.78	3.34	3.89	4.45	5.00	
1200	400	15.00	16.80	18.60	20.20	21.80	23.40	24.90	26.30	27.60	28.90	30.10	31.20	32.30	33.30	34.20	35.00	35.80	36.40	-	-	-	-	-	-	0.00	0.58	1.16	1.74	2.32	2.90	3.48	4.06	4.64	5.22	
1250	400	15.00	16.80	18.60	20.20	21.80	23.40	24.90	26.20	27.50	28.70	29.90	31.00	31.90	32.80	33.70	34.40	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.60	1.21	1.81	2.42	3.02	3.63	4.23	4.84	5.44	

Para una velocidad de giro de 990 rpm, un diámetro de 400mm de la polea menor y una prestación adicional por relación de transmisión de 2 HP se tiene:

- Potencia base (P_b) = 26,9 HP = 20,06kW
- Potencia adicional (P_{ad}) = 4,35 HP = 3,24 kW

La potencia resultante (P_{bk}) es la suma de ambas:

$$P_{bk} = P_b + P_{ad} = 20,06kW + 3,24 kW = 23,3 kW$$

Con la potencia resultante y los factores de corrección se calcula la potencia efectiva (P_e) por correa:

$$P_e = P_{bk} * F_{cl} * F_c = 23,3 kW * 1,08 * 0,965 = 23,37 kW$$

Por lo tanto, el número de correas necesarias a montar en paralelo es:

$$\text{Número de correas} = \frac{P_c}{P_e} = \frac{169kW}{23,37kW} = 7,23 \rightarrow \mathbf{8 \text{ correas}}$$

Por último, indicar que la transmisión por correas requiere de un tensado previo a su uso para que estas tengan un buen comportamiento, sin este tensado, es probable que se produzca un deslizamiento inmediatamente después de su puesta en marcha o al cabo de un tiempo de uso. Esto se debe a que la correa sufre un estiramiento posterior a su montaje y funcionamiento que hay que contrarrestar con este tensado.

Si se implementa este púlper a nivel industrial, deberá comprobarse que las correas no deslizan, a la vez que el tensado necesario para evitar dicho deslizamiento. No obstante, esta serie de cálculos mecánicos tan detallados no es el objetivo principal de dicho proyecto.

6. Eje principal

Por razones geométricas, de espacio y referencias externas, se cree que una longitud adecuada para el eje son 500mm, más 100mm adicionales en cada extremo para la conexión de las poleas.

Una vez definida la longitud del eje, se pasará a definir las fuerzas que actúan sobre él:

Peso del fluido (P_f) que hay en la cuba, para ello se calcula primero la masa de fluido del recipiente (M_f) a partir del volumen del recipiente y la densidad del fluido:

$$M_f = V * \rho = 47,784m^3 * 1090 \frac{kg}{m^3} = 52.0804,56 kg$$

$$P_f = M_f * g = 52084,56 kg * 9,8 \frac{m}{s^2} = 510.428,69 N$$

Teniendo en cuenta la proporción del área que cubre el rotor:

$$\frac{A_{rotor}}{A_{total}} = \frac{\pi * r^2}{\pi * R^2} = \frac{\pi * 0,5^2}{\pi * 1,815^2} = 0,0759$$

Se calcula el peso que soporta el eje (P_{eje}):

$$P_{eje} = P_f * \frac{A_{rotor}}{A_{total}} = 510.428,9N * 0,0759 = 38.736,65N$$

El resto del peso será soportado por los apoyos del depósito, junto con el peso propio de este.

Además del peso del fluido, la correa transmite una fuerza que se puede ver representada gráficamente en la figura II.6.1.

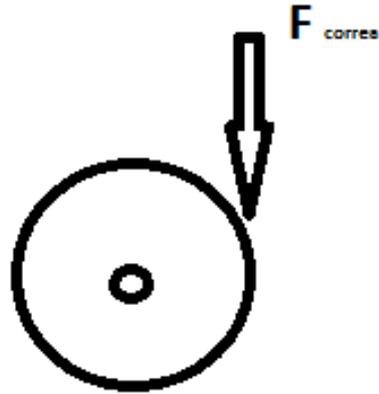


Figura II.6.1: Representación de la fuerza que transmite la correa

Esta fuerza es equivalente a una fuerza en el centro del eje más un momento torsor que hace girar la maquina con la potencia requerida.

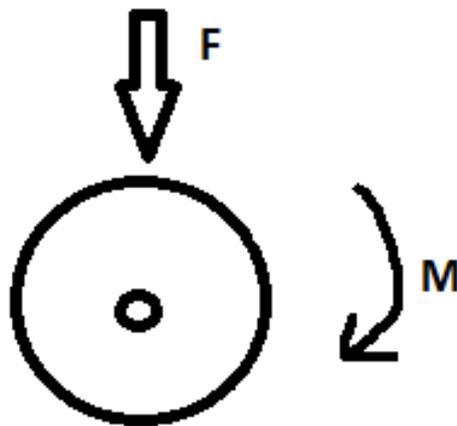


Figura II.6.2: Simplificación de la fuerza que transmite la correa

Debido a que el eje gira libremente gracias a los rodamientos, no existe torsión en el eje.

Una vez que se tienen las fuerzas, se procede a calcular el diagrama de esfuerzos del eje. Para ello se supone un caso biapoyado con un apoyo móvil para facilitar el cálculo, porque la diferencia con un caso biapoyado con apoyos fijos no va a ser muy grande, ya que uno de los dos rodamientos (como se verá en el apartado 7) no soporta a penas carga axial, la soporta en su mayoría el otro rodamiento.

La disposición del diagrama se ve en la figura II.6.3:

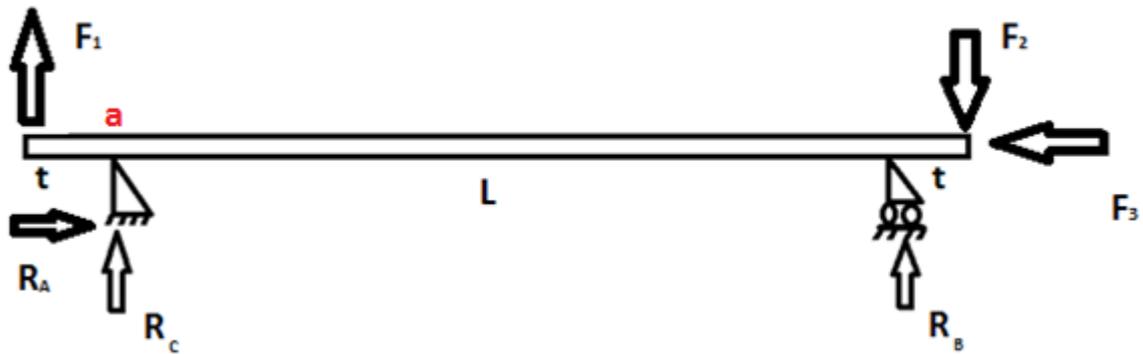


Figura II.6.3: Esquema de las fuerzas que actúan en el eje

Donde:

- $L = 0,5\text{m}$
- $t = 0,1\text{m}$

$$F_3 = P_{eje} = 38.736,65 \text{ N}$$

$$F_2 = \frac{\text{Par resistente}}{R_{rotor}} = \frac{\frac{P}{\omega_2}}{R_{rotor}} = \frac{\frac{130 \text{ kW} * \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}}}{34,55 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}}{0,5 \text{ m}} = 7524,73 \text{ N}$$

$$F_1 = \frac{\text{Par correa}}{R_{Polea Mayor}} = \frac{\frac{P}{\omega_2}}{R_{Polea Mayor}} = \frac{\frac{130 \text{ kW} * \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}}}{34,55 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}}{0,6 \text{ m}} = 6.271,1 \text{ N}$$

Se calculan las reacciones en los apoyos mediante el método de equilibrios:

$$\Sigma F = 0 \rightarrow F_2 - F_1 - R_C - R_B = 0$$

$$\Sigma M_{(a)} = 0 \rightarrow F_1 * t + F_2 * (t + L) - R_B * L = 0$$

Se considera el punto (a), representado en la figura II.6.3, como el punto del apoyo fijo en la barra para el cálculo de momentos.

$$R_B = \frac{F_1 * t + F_2 * (t + L)}{L} = \frac{6.271,1N * 0,1m + 7.524,73N * (0,1m + 0,5m)}{0,5m} = 10.283,9N$$

$$R_C = F_2 - F_1 - R_B = 7.524,73N - 6.271,1N - 10.283,9N = -9.030,27N$$

El signo negativo significa que la fuerza va en sentido contrario a la que hemos puesto previamente en el dibujo.

$$R_A = F_3 = 38.736,65N$$

De modo que las fuerzas que actúan sobre nuestro eje son las siguientes:

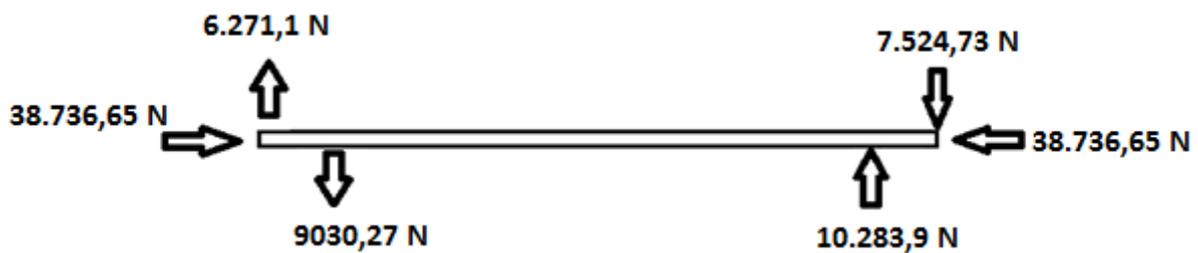


Figura II.6.4: Fuerzas que soporta el eje

Se representan los diagramas de esfuerzos axiales y cortantes, y momento flector del eje:

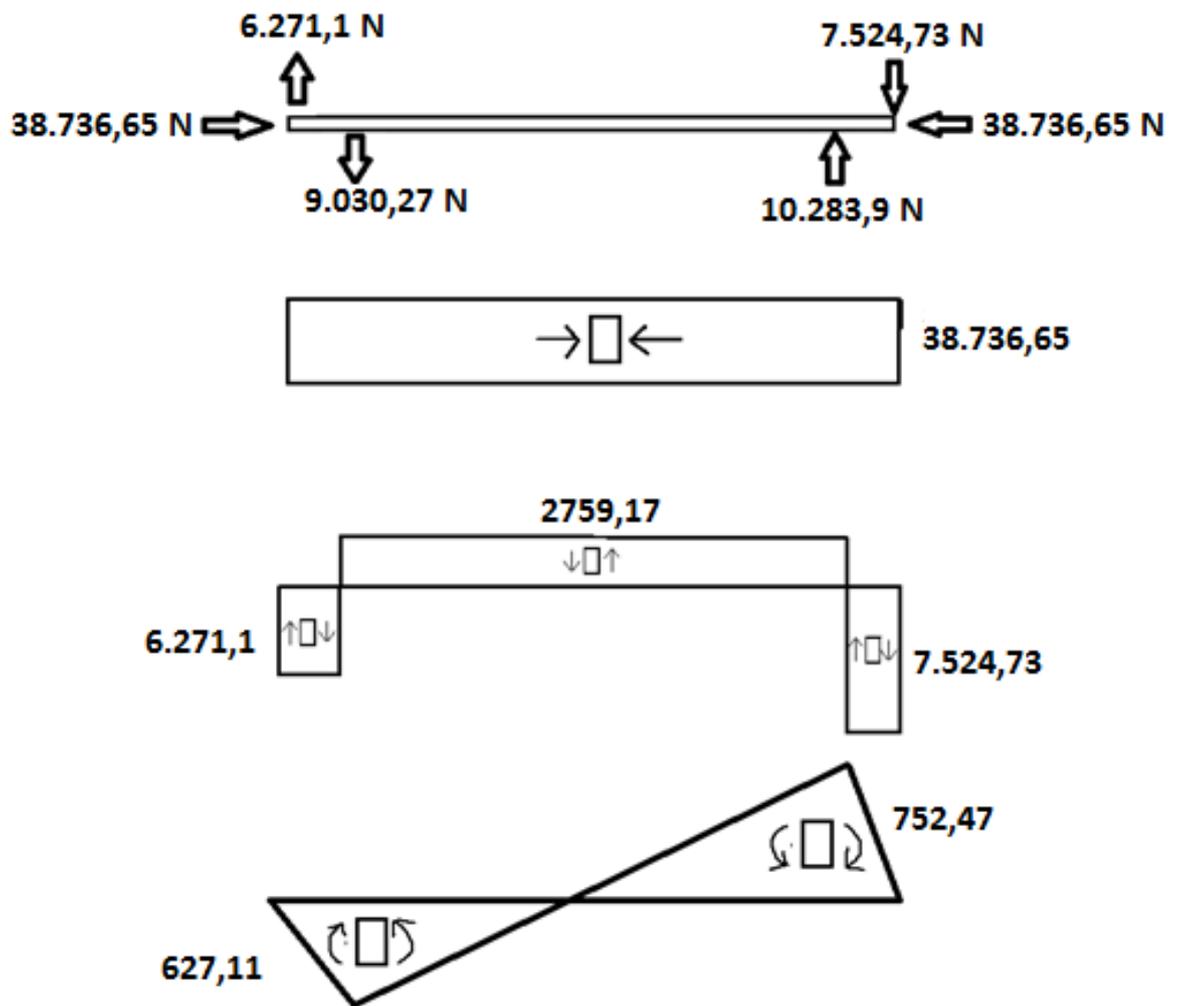


Figura II.6.5: Diagrama de esfuerzo axial, esfuerzo cortante y momento flector para nuestro eje

La sección más crítica se encuentra en el apoyo móvil (rodamiento), donde los esfuerzos son:

- Momento flector (M) = 752,47 N·m
- Esfuerzo cortante (V) = 7.524,73 N
- Esfuerzo axial (N) = 38.736,65 N

El momento de inercia del círculo es:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4}$$

Se calcula el valor de la tensión normal en la dirección x (σ_x) en función del radio:

$$\sigma_x = \frac{M}{I}y + \frac{N}{A} = \frac{752,47}{\frac{\pi * r^4}{4}} * r + \frac{38.736,65}{\pi * r^2} = \frac{958,07}{r^3} + \frac{12.330,26}{r^2}$$

El valor de la tensión tangencial en la dirección xy (σ_{xy}) es 0 en el punto más crítico, porque la distribución de tensiones en una sección circular es la siguiente:

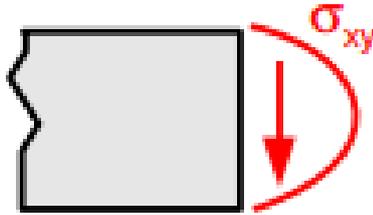


Figura II.6.6: Distribución de tensiones en una sección circular

Como se puede ver en el punto más alto (de máxima tensión normal), la tensión tangencial es nula.

A continuación, se elige un material para la fabricación del eje, en la tabla II.6.1 se muestran las características más importantes de los posibles aceros.

Tabla II.6.1: Características mecánicas de los aceros comerciales

AISI	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	LÍMITE ELÁSTICO	ALARGAMIENTO	DUREZA/HARDRESS	
	Tensile Strength Kg/mm ²	Yield Point Rp 0.2 % Kg/mm ² Mín	Elongation E=50 mm A % Mín	H R _b Máx	Brinell Máx
201	70-80	30	50	95	201
301	52-75	21	30	88	185
302	52-70	21	30	88	183
302 B	55-75	21	35	88	183
303	52-70	21	40	90	180
304	50-70	21	40	88	183
304 L	50-65	18	40	88	183
304 H	75	30	40	92	183
304 LN	75	30	40	92	202
305	50-70	20	40	88	183
308	50-70	21	40	88	183
309	50-75	25	40	95	217
309 S	50-75	25	40	95	217
310	50-75	25	40	95	217
310 S	50-75	25	40	95	217
314	50-75	25	40	95	217
316	50-75	21	40	95	217
316 L	50-70	18	40	95	217
316 N	80	35	30	95	217
316 LN	75	30	30	95	217

Elegimos el **acero 316** que es muy usado en este tipo de equipos. Es un acero inoxidable austenítico con características mecánicas muy buenas, lo que ayudará a requerir un diámetro menor, y facilitará por tanto la posterior búsqueda de rodamientos para el eje.

- Resistencia a tracción: $62,5 \frac{kg}{mm^2} = 613 MPa$
- Límite elástico: $25 \frac{kg}{mm^2} = 206 MPa$

Se dimensionará el eje del rotor mediante dos métodos diferentes y se tomará el más restrictivo de los dos:

- Método estático
- Método dinámico o frente a fatiga

Además, se comprobará que el eje no padea para el tamaño dimensionado.

- **Método estático**

Se utilizará el criterio de Tresca:

Se tiene flexión en un único plano, y en el punto de máxima tensión normal (la que interesa) no existe tensión tangencial (como se ha visto anteriormente), por lo que queda la siguiente expresión:

$$\tau^{max} \leq \frac{\sigma_e}{2} \rightarrow \frac{\sigma_x}{2} \leq \frac{\sigma_e}{2} \rightarrow \sigma_x \leq \sigma_e$$

Sustituyendo valores se obtiene un radio del eje de:

$$\frac{958,07}{r^3} + \frac{12.330,26}{r^2} \leq 206 \cdot 10^6 \rightarrow r \geq \mathbf{0,0179m}$$

- **Método dinámico o frente a fatiga**

También es importante dimensionar el eje frente a **fatiga**, ya que, en la mayoría de los casos, este criterio es más restrictivo que el método estático.

Se necesita una vida útil mayor de 10^6 ciclos, por lo que se considera vida infinita. Para ello se aplica el criterio de Stephan Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

Donde:

- σ_a tensión alternante
- σ_m tensión media
- S_e límite a fatiga
- S_{ut} límite último de resistencia del material

Se tiene un eje girando a velocidad constante, por lo que la distribución de esfuerzos sigue la siguiente secuencia temporal, en la sección más crítica que hemos visto en el criterio estático:

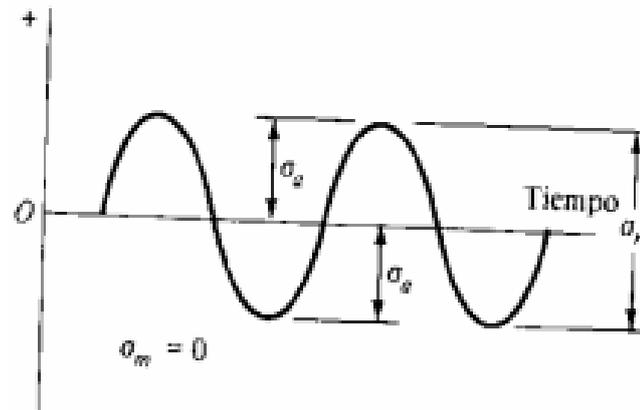


Figura II.6.7: Representación gráfica de los parámetros de la ecuación de Stephan Goodman

Solo se tiene tensión normal, que va a depender del radio del eje.

$$\sigma_{Max} = \frac{M}{I} * y + \frac{N}{A} = \frac{958,07}{r^3} + \frac{12.330,26}{r^2}$$

$$\sigma_{Min} = -\frac{M}{I} * y + \frac{N}{A} = -\frac{958,07}{r^3} + \frac{12.330,26}{r^2}$$

Debido a que el eje está girando continuamente, si se coge el punto crítico, va a pasar de tener la tensión máxima a la tensión mínima pasando por el cero, dado que es simétrico.

Con estos valores de σ_{Max} y σ_{min} se calcula σ_a y σ_m :

$$\sigma_m = \frac{-\frac{M}{I} * y + \frac{N}{A} + \frac{M}{I} * y + \frac{N}{A}}{2} = 2 * \frac{12.330,26}{r^2} = \frac{24.660,52}{r^2}$$

$$\sigma_a = \frac{+\frac{M}{I} * y + \frac{N}{A} + \frac{M}{I} * y - \frac{N}{A}}{2} = 2 * \frac{958,07}{r^3} = \frac{1.916,14}{r^3}$$

Con estos valores, se calcula el límite a fatiga según la correlación de Mischke (S'_e):

- Para $S_{ut} \leq 1400$ MPa $S'_e = 0,504 * S_{ut}$
- Para $S_{ut} \geq 1400$ MPa $S'_e = 700$ MPa

Como $S_{ut} = 613$ MPa es menor de 1400 MPa se usa la primera ecuación.

$$S'_e = 0,504 * 613 \text{ MPa} = 308,95 \text{ MPa}$$

Se pasa a calcular los factores de corrección del límite a fatiga:

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * S'_e$$

Donde:

1. K_a es el coeficiente para el acabado superficial:

La fatiga en los elementos se inicia en los puntos con modificaciones en la microestructura, poros o inclusiones, donde se produce la concentración de tensiones. Un acabado poco fino lleva a lugares de inicio del proceso de fatiga, donde se inicia el fallo hasta producir la rotura final. Para ello se calcula el factor de acabado superficial en función de S_{ut} a través de la siguiente expresión:

$$K_a = a * S_{ut}^b$$

Los valores de a y b se obtienen de la figura II.6.8:

ACABADO DE SUPERFICIE	FACTOR a		EXPONENTE b
	kpsi	MPa	
Esmerilado (rectificado)	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o estirado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Forjado	39.9	272.	-0.995

Figura II.6.8: Factores para el cálculo del coeficiente para el acabado superficial

Se supone que el eje está maquinado o estirado en frío por lo que:

- $A = 4,51$
- $b = -0,265$

$$K_a = 4,51 * 613^{-0,265} = 0,823$$

2. K_b es el coeficiente para el factor de tamaño

Debido a que habitualmente el tamaño del elemento es mayor que el de la probeta donde se realiza el ensayo, es más probable que este tenga defectos, y por ello, presente resistencias menores. Para corregir estos errores se utiliza el coeficiente K_b que se calcula de la siguiente manera:

- Para $2,79 \leq d \leq 51\text{mm}$ $K_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107}$
- Para $d \geq 51\text{mm}$ $K_b = [0,6 - 0,75]$

Se supone el diámetro calculado en el procedimiento estático (en ningún caso se va a obtener un diámetro mayor de 51mm) por lo tanto usamos la primera ecuación:

$$K_b = \left(\frac{17,9\text{mm}}{7,62}\right)^{-0,107} = 0,913$$

3. K_c es el factor de fiabilidad

Para este factor se supone una desviación estándar de un 8% y distribuciones gaussianas de probabilidad para la resistencia a fatiga. El factor se obtiene de la tabla II.6.2:

Tabla II.6.2: Factor de fiabilidad en función de la probabilidad de supervivencia

Probabilidad de supervivencia (%)	Factor de fiabilidad (k_c)
50	1
90	0,9
95	0,87
99	0,82
99,9	0,75
99,99	0,7

Se supone una fiabilidad del 99,9% por lo que K_c es 0,75.

4. K_d es el factor de temperatura

Al ser diferente la temperatura a la que se realiza el ensayo de la temperatura de servicio, cambia el comportamiento tanto en estático como en dinámico. Generalmente, el límite de fatiga aumenta en los aceros a baja temperatura, pero aumenta su fragilidad. A altas temperaturas, no existe límite de resistencia a fatiga y es necesario considerar el fenómeno de creep.

A temperaturas medias, que son a las que trabajará el eje, el factor de temperatura se puede obtener de la siguiente expresión:

$$K_d = \frac{S_T}{S_{ut}}$$

Que su valor viene tabulado para diferentes temperaturas en la Tabla II.6.3.

Tabla II.6.3: Correlación del factor K_d con la temperatura

Temperatura (°C)	S_T/S_{ut}
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,927
400	0,922
450	0,840
500	0,766
550	0,670
600	0,546

La temperatura de trabajo del eje está en torno a los 20°C por lo que el valor de este factor es 1.

5. K_e es el factor geométrico

Los fallos por fatiga aparecen en los puntos de discontinuidad (cambios bruscos de sección, taladros u otras variaciones en la geometría etc). La geometría específica y particular de la pieza puede hacerla más sensible al fallo por fatiga, debido a zonas donde se produzca concentración de tensiones.

Dado que no hay discontinuidades en el eje, $K_e = 1$

Por lo tanto, el valor de resistencia a fatiga es:

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * S'_e = 0,823 * 0,913 * 0,75 * 1 * 1 * 308,95 MPa = 174,11 MPa$$

Una vez calculada la resistencia a fatiga corregida, se utiliza el criterio de Stephan Goodman para calcular el diámetro del eje:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

Se supone un factor de seguridad $n=1,2$:

$$\frac{\frac{1.916,14}{r^3}}{174,11 * 10^6} + \frac{\frac{24.660,52}{r^2}}{613 * 10^6} = \frac{1}{1,2}$$

Se obtiene un radio de eje:

$$r = 0,0243 \text{ m} = \mathbf{24,3 \text{ mm}}$$

Como se había previsto, este criterio es más restrictivo, por lo que se necesita una barra en el eje de 23mm. No obstante, se elige un eje de **25mm** dado que se venden comercialmente sin necesidad de mecanizado posterior, además, coincidirá con el diámetro de los rodamientos de un catálogo comercial.

Una vez tenemos el diámetro comprobamos la relación $L/D > 10$:

$$\frac{L}{D} = \frac{L}{2R} = \frac{700\text{mm}}{2 * 25\text{mm}} = 14 > 10$$

Por tanto, se trata de una barra esbelta, y están correctamente aplicadas las hipótesis de la resistencia de los materiales.

- **Comprobación frente a pandeo**

Por último, dado que el efecto del esfuerzo axial es bastante importante en comparación con el momento flector, se realizará un cálculo para comprobar que el eje no padea cuando el púlper se encuentre cargado, que es cuando se producirá el máximo esfuerzo axial debido al peso del fluido.

$$N^{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{(\beta * L)^2}$$

Donde:

- E: módulo elástico del acero = $2,1 \cdot 10^5$ MPa
- I_z : momento de inercia, al tratarse de una sección circular:

$$I_z = \frac{\pi * r^4}{4} = \frac{\pi * 0,025^4}{4} = 3,06 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

- β : coeficiente de pandeo, para el caso de una barra biapoyada $\beta=1$.
- L: longitud de pandeo = 0,5m.

La interpretación del valor de N^{cr} que se obtiene es la siguiente:

- Si $N < N^{cr}$, la barra tiene rigidez suficiente para restablecer su posición recta, por lo tanto, **el eje no padea**
- Si $N = N^{cr}$, cualquier amplitud del desplazamiento es compatible con el equilibrio, quedando aquella **indeterminada**.
- Si $N > N^{cr}$, no puede haber posición de equilibrio más que la trivial. No es realista pensar en este equilibrio, ya que siempre habrá imperfecciones, por lo tanto, **el eje padea**.

Donde N es el esfuerzo axial máximo que soporta el eje.

$$N^{cr} = \frac{\pi^2 * 2,1 \cdot 10^{11} Pa * 3,06 \cdot 10^{-7} m^4}{(1 * 0,5m)^2} = 2,54 \cdot 10^6 N$$

$$N = 3,87 \cdot 10^4 N < N^{cr} = 2,54 \cdot 10^6 N$$

Por tanto, **no se producirá pandeo en el eje**.

7. Rodamientos

Se han elegido rodamientos en el sistema motriz del púlper en lugar de cojinetes de fricción, ya que en estos, el rozamiento es independiente con la velocidad (en los cojinetes el deslizamiento aumenta con la velocidad), por lo que los cojinetes están pensados para aplicaciones a mayores rpm. Además, el mantenimiento es más sencillo que en los cojinetes, están más normalizados, por lo que es más sencillo diseñarlos, comprarlos y conseguir repuestos. Por último, una ventaja fundamental es que soportan las cargas radiales y axiales, en especial los rodamientos cónicos que se van a emplear.

Se toma el valor de las fuerzas calculadas a partir del esquema mostrado en la figura II.6.3:

- $F_{rA} = 9.030,27 N$ (fuerza radial en el apoyo A)
- $F_{rB} = 10.283,9 N$ (fuerza radial en el apoyo B)

Como consecuencia de F_r se induce una fuerza axial F_a^R debido a la conicidad.

$$F_a^R = \frac{0,5 * F_r}{Y}$$

Esta fuerza axial inducida está presente en los dos rodamientos:

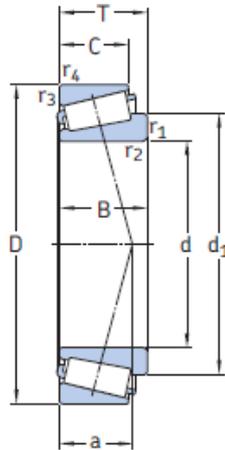
- Rodamiento A:

$$F_{aA}^R = \frac{0,5 * F_{rA}}{Y_A}$$

- Rodamiento B:

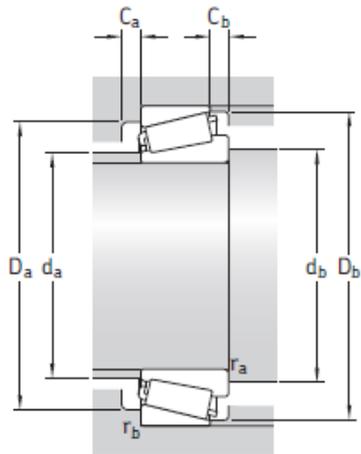
$$F_{aB}^R = \frac{0,5 * F_{rB}}{Y_B}$$

En las figuras II.7.1 y II.7.2 se muestra el catálogo de rodamientos SKF consultado, en la sección de rodamientos cónicos, en concreto para un diámetro interior (d) de 50mm, ya que el eje tiene un radio de 25 mm. Se preselecciona el **rodamiento 32010X/Q**.



Dimensiones principales	Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades nominales		Masa	Designación	Series de dimensiones para la normativa ISO 355 (ABMA)		
	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite					
d D T	kN		kN	r. p. m.		kg	-	-		
mm	kN		kN	r. p. m.		kg	-	-		
46	75	18	50,1	71	7,65	6 300	9 500	0,3	LM 503349/310/QCL7C	(LM 503300)
50	80	20	60,5	88	9,65	6 000	8 000	0,38	32010 X/Q	3CC
	80	20	60,5	88	9,65	6 000	8 000	0,38	32010 X/QCL7CVB026	3CC
	80	24	69,3	102	11,4	6 000	8 000	0,45	33010/Q	2CE
	82	21,5	72,1	100	11	6 000	8 500	0,43	JLM 104948 AA/910 AA/Q	2CC
	85	26	85,8	122	13,4	5 600	7 500	0,58	33110/Q	3CE
	90	21,75	76,5	91,5	10,4	5 600	7 500	0,54	30210 J2/Q	3DB
	90	24,75	82,5	100	11,4	5 600	7 500	0,62	32210 J2/Q	3DC
	90	28	106	140	16	5 300	8 000	0,75	JM 205149/110 A/Q	(M 205100)
	90	28	106	140	16	5 300	8 000	0,75	JM 205149/110/Q	2DD
	90	32	114	160	18,3	5 000	7 000	0,86	33210/Q	3DE
	100	36	154	200	22,4	5 000	7 500	1,3	T2ED 050/Q	2ED
	105	32	108	137	16	4 300	6 300	1,25	T7FC 050/QCL7C	7FC
	110	29,25	143	140	16,6	5 300	6 300	1,25	* 30310 J2/Q	2FB
	110	29,25	122	120	14,3	4 500	6 000	1,2	* 31310 J2/QCL7C	7FB
110	42,25	183	216	24,5	4 500	6 000	1,95	* 32310 BJ2/QCL7C	5FD	
110	42,25	172	212	24	4 300	6 300	1,85	32310 J2/Q	2FD	
55	90	23	80,9	116	12,9	5 300	7 000	0,56	32011 X/Q	3CC
	90	27	104	137	15,3	5 600	7 000	0,66	* 33011/Q	2CE
	95	30	110	156	17,6	5 000	6 700	0,85	33111/Q	3CE
	100	22,75	104	106	12	5 300	6 700	0,7	* 30211 J2/Q	3DB
	100	26,75	106	129	15	5 000	6 700	0,84	32211 J2/Q	3DC
	100	35	138	190	21,6	4 500	6 300	1,15	33211/Q	3DE
	110	39	179	232	26	4 500	6 700	1,7	T2ED 055/QCLN	2FD
	115	34	125	163	19,3	4 000	5 600	1,6	T7FC 055/QCL7C	7FC
	120	31,5	166	163	19,3	4 800	5 600	1,55	* 30311 J2/Q	2FB
	120	31,5	121	137	16,6	3 800	5 600	1,55	31311 J2/QCL7C	7FB
	120	45,5	216	260	30	4 300	5 600	2,5	* 32311 BJ2/QCL7C	5FD
	120	45,5	198	250	28,5	4 000	5 600	2,35	32311 J2	2FD

Figura II.7.1: Catálogo comercial de rodamientos SKF (Parte 1)



Dimensiones						Dimensiones de resaltes y radios de acuerdo										Factores de cálculo		
d	d_1	B	C	$r_{1,2}$ min.	$r_{3,4}$ min.	a	d_a máx.	d_b mín.	D_a mín.	D_a máx.	D_b mín.	C_a mín.	C_b mín.	r_a máx.	r_b máx.	e	Y	Y_0
mm						mm										-		
46	61	18	14	2,3	1,6	16	53	55	67	67,5	71	2	4	2,3	1,5	0,4	1,5	0,8
50	65,9	20	15,5	1	1	18	56	56	72	74	77	4	4,5	1	1	0,43	1,4	0,8
	65,9	20	15,5	3	1	18	56	56	72	74	77	4	4,5	1	1	0,43	1,4	0,8
	65,3	24	19	1	1	17	56	56	72	74	76	4	5	1	1	0,31	1,9	1,1
	65,1	21,5	17	3,6	1,2	16	57	62	74	76	78	4	4,5	3,4	1,2	0,3	2	1,1
	68	26	20	1,5	1,5	20	56	57	74	78	82	4	6	1,5	1,5	0,4	1,5	0,8
	68	20	17	1,5	1,5	19	58	57	79	83	85	3	4,5	1,5	1,5	0,43	1,4	0,8
	68,6	23	19	1,5	1,5	21	58	57	78	83	85	3	5,5	1,5	1,5	0,43	1,4	0,8
	68,8	28	23	3	2,5	20	58	64	78	85	85	5	5	2,5	0,8	0,33	1,8	1
	68,8	28	23	3	2,5	20	58	64	78	78	85	5	5	2,5	2,5	0,33	1,8	1
	70,8	32	24,5	1,5	1,5	23	57	57	77	83	87	5	7,5	1,5	1,5	0,4	1,5	0,8
73,5	35	30	2,5	2,5	25	59	60	84	88	94	6	6	2,5	2,5	0,35	1,7	0,9	
81,3	29	22,5	3	3	36	60	62	78	91	100	4	10	2,5	2,5	0,88	0,68	0,4	
77,2	27	23	2,5	2	23	65	60	95	100	102	4	6	2,5	2	0,35	1,7	0,9	
81,5	27	19	2,5	2	34	62	60	87	100	104	4	10	2,5	2	0,83	0,72	0,4	
83,1	40	33	2,5	2	34	60	60	83	100	103	5	9	2,5	2	0,54	1,1	0,6	
77,8	40	33	2,5	2	27	62	60	90	100	102	5	9	2,5	2	0,35	1,7	0,9	
55	73,3	23	17,5	1,5	1,5	19	63	62	81	83	86	4	5,5	1,5	1,5	0,4	1,5	0,8
	73,1	27	21	1,5	1,5	19	63	62	81	83	86	5	6	1,5	1,5	0,31	1,9	1,1
	75,1	30	23	1,5	1,5	22	62	62	83	88	91	5	7	1,5	1,5	0,37	1,6	0,9
	74,7	21	18	2	1,5	20	64	64	88	91	94	4	4,5	2	1,5	0,4	1,5	0,8
	75,3	25	21	2	1,5	22	63	64	87	91	95	4	5,5	2	1,5	0,4	1,5	0,8
	78,1	35	27	2	1,5	25	62	64	85	91	96	6	8	2	1,5	0,4	1,5	0,8
	80,9	39	32	2,5	2,5	27	66	65	93	99	104	7	7	2,5	2,5	0,35	1,7	0,9
	89,5	31	23,5	3	3	39	66	67	86	103	109	4	10,5	2,5	2,5	0,88	0,68	0,4
	84	29	25	2,5	2	24	71	65	104	110	111	4	6,5	2,5	2	0,35	1,7	0,9
	88,4	29	21	2,5	2	37	68	65	94	110	113	4	10,5	2,5	2	0,83	0,72	0,4
90,5	43	35	2,5	2	36	65	65	91	110	112	5	10,5	2,5	2	0,54	1,1	0,6	
84,6	43	35	2,5	2	29	68	65	99	110	111	5	10,5	2,5	2	0,35	1,7	0,9	

Figura II.7.2: Catálogo comercial de rodamientos SKF (Parte 2)

El rodamiento preseleccionado tiene un valor de Y de 1,4, con este valor se calculan las fuerzas en los dos rodamientos:

$$F_{aA}^R = \frac{0,5 * F_{rA}}{Y_A} = \frac{0,5 * 9030,27N}{1,4} = 3.225,1 N$$

$$F_{aB}^R = \frac{0,5 * F_{rB}}{Y_B} = \frac{0,5 * 10.283,9N}{1,4} = 3.672,82N$$

Se elije un montaje en X o “face to face” para los rodamientos.

Se tiene que ver en cuál de los siguientes casos estamos, según la figura II.7.3:

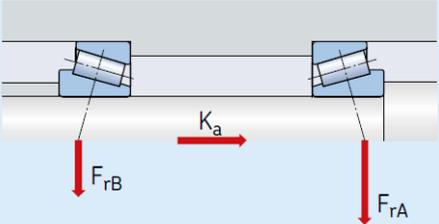
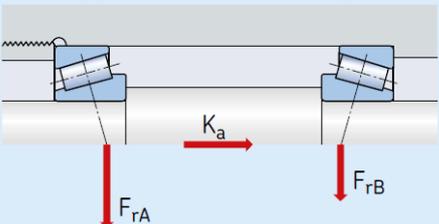
Axial loading of bearing arrangements incorporating two single row tapered roller bearings and/or bearing pairs in tandem			
Bearing arrangement	Load case	Axial loads	
Back-to-back 	Case 1a $\frac{F_{rA}}{Y_A} \geq \frac{F_{rB}}{Y_B}$ $K_a \geq 0$	$F_{aA} = \frac{0,5 F_{rB}}{Y_A}$	$F_{aB} = F_{aA} + K_a$
	Case 1b $\frac{F_{rA}}{Y_A} < \frac{F_{rB}}{Y_B}$ $K_a \geq 0,5 \left(\frac{F_{rB}}{Y_B} - \frac{F_{rA}}{Y_A} \right)$	$F_{aA} = \frac{0,5 F_{rB}}{Y_A}$	$F_{aB} = F_{aA} + K_a$
Face-to-face 	Case 1c $\frac{F_{rA}}{Y_A} < \frac{F_{rB}}{Y_B}$ $K_a < 0,5 \left(\frac{F_{rB}}{Y_B} - \frac{F_{rA}}{Y_A} \right)$	$F_{aA} = F_{aB} - K_a$	$F_{aB} = \frac{0,5 F_{rB}}{Y_B}$

Figura II.7.3: Modos de trabajo de los rodamientos para un montaje en X

Los rodamientos no se encuentran en el caso 1a porque F_{aB}^R es mayor que F_{aA}^R .

Para que los rodamientos se encuentren en el caso 1b se tiene que cumplir que K_a (fuerza axial que soporta el rodamiento debido al peso) sea mayor que la diferencia de las dos fuerzas axiales inducidas.

Los datos que tenemos son los siguientes:

- $K_a = 38.736,65 \text{ N}$
- $F_{aB}^R - F_{aA}^R = 447,72 \text{ N}$

Por lo que los rodamientos se encuentran en el caso 1b. Por lo tanto, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$F_{aA} = F_{aA}^R = 3.225,1 \text{ N}$$

$$F_{aB} = F_{aB}^R + K_a = 3.672,82 \text{ N} + 38.736,65 \text{ N} = 42.409,47 \text{ N}$$

Con estas cargas se calculan las cargas radiales equivalentes, para ello se compara la fuerza axial entre la fuerza radial y se ve si es menor o igual a un valor $e=0,43$ que se encuentra en el catálogo, en la figura II.7.2 mostrada anteriormente:

$$\frac{F_{aA}}{F_{rA}} = \frac{3.225,1 \text{ N}}{9030,27 \text{ N}} = 0,357$$

$$\frac{F_{aB}}{F_{rB}} = \frac{42.409,47 \text{ N}}{10.283,9 \text{ N}} = 4,12$$

Para el rodamiento A, como $\frac{F_{aA}}{F_{rA}} < 0,43$, la fuerza equivalente F_{eA}

$$F_{eA} = F_{rA} = 9.030,27 \text{ N}$$

Para el rodamiento B, como $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} > 0,43$, la fuerza equivalente es:

$$\begin{aligned} F_{eB} &= 0,4 * F_{rB} + Y * F_{aB} = 0,4 * 10.283,9 \text{ N} + 1,4 * 42.409,47 \text{ N} \\ &= 63.486,82 \text{ N} \end{aligned}$$

El equipo se pretende que tenga una vida útil de 20 años, por lo que:

$$20 \text{ años} * \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ seg}} = 630.720.000 \text{ seg}$$

Se pasa este valor a horas para poder compararlo con los valores expresados en la tabla II.7.1 que se mostrará a continuación.

$$630.720.000\text{seg} * \frac{1\text{min}}{60\text{seg}} * \frac{1\text{h}}{60\text{min}} = 175.200 \text{ h}$$

Tabla II.7.1: Valores orientativos de la vida útil especificada de los rodamientos en diferentes tipos de máquinas

Valores orientativos de la vida útil especificada de los diferentes tipos de máquinas	
Tipo de máquina	Vida útil especificada Horas de funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico	300 ... 3 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos: herramientas eléctricas portátiles, dispositivos de elevación en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3 000 ... 8 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos donde se requiere una alta confiabilidad: ascensores (elevadores), grúas para productos embalados o eslingas para tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo: transmisiones por engranajes de uso general, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras giratorias	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario utilizando plenamente sus capacidades: herramientas mecánicas, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos de impresión, separadores y centrifugadoras	20 000 ... 30 000
Máquinas para 24 horas de trabajo continuo: unidades de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40 000 ... 50 000
Maquinaria para energía eólica, incluidos los rodamientos del eje principal, de orientación, de la caja de engranajes de cambio de paso, del generador	30 000 ... 100 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas de trenzado de cables, maquinaria de propulsión para buques de alta mar	60 000 ... 100 000
Máquinas eléctricas de gran tamaño, plantas de generación de energía, bombas para minas, ventiladores para minas, rodamientos para ejes en túnel para buques de alta mar	> 100 000

De acuerdo con lo expuesto en la tabla II.7.1, y por referencias, se decide hacer un cambio de rodamientos en el equipo cada 5 años, de modo que el tiempo de vida útil de estos será:

$$\frac{630.720.000\text{seg}}{20 \text{ años}} * 5 \text{ años} = 157.680.000\text{seg} = 43.800\text{h}$$

Se calcula el número de ciclos en el tiempo de vida de los rodamientos:

$$157.680.000 * \frac{1\text{min}}{60\text{seg}} * \frac{330\text{rev}}{1 \text{ min}} = 867.240.000 \text{ rev}$$

El cálculo de rodamientos se basa en la capacidad dinámica de carga (C), que se define como la fuerza radial (en este caso equivalente, F_e) que es capaz de soportar un grupo de rodamientos para tener una vida L_{10} (a un 90% de confianza) de un millón de ciclos.

$$L_{10} = 10^6 * \left(\frac{C}{F}\right)^a \rightarrow C = F_e * \left(\frac{L_{10}}{10^6}\right)^{\frac{1}{a}}$$

El valor del parámetro a del exponente es 3,333 al tratarse de rodamientos cónicos.

- Rodamiento A:

$$C_A = F_{eA} * \left(\frac{L_{10}}{10^6}\right)^{\frac{1}{a}} = 9.030,27N * \left(\frac{867.240.000 \text{ rev}}{10^6}\right)^{\frac{1}{3,333}} = 68.743,35 N$$

Se necesita una capacidad de carga básica dinámica de 68,7 kN, el rodamiento que se había preseleccionado tiene un valor de 60,5kN por lo que no soporta la suficiente carga.

Se debe realizar una segunda iteración, esta vez se preselecciona el **rodamiento 33010/Q**, que tiene una capacidad de carga básica dinámica de 69,3kN.

- Rodamiento B:

$$C_B = F_{eB} * \left(\frac{L_{10}}{10^6}\right)^{\frac{1}{a}} = 63.486,82 N * \left(\frac{867.240.000 \text{ rev}}{10^6}\right)^{\frac{1}{3,333}} = 483.296,35 N$$

Este rodamiento es el que va a soportar prácticamente toda la carga que transmite el eje debida al peso del púlper, por lo que para un diámetro de 50mm no se tiene en el catálogo ningún rodamiento cónico que soporte tanta carga.

Se va a proceder a montar **3 hileras de rodamiento 32310 J2/Q** que tiene un valor de carga básica dinámica por hilera de 172kN. Al igual que en el caso anterior, este rodamiento no es el preseleccionado, por lo que se requiere una nueva iteración.

Con estos nuevos rodamientos se tienen los siguientes valores extraídos del catálogo:

- $Y_A = 1,9$
- $Y_B = 1,7$

$$F_{aA}^R = \frac{0,5 * F_{rA}}{Y_A} = \frac{0,5 * 9.030,27 \text{ N}}{1,9} = 2.376,38 \text{ N}$$

$$F_{aB}^R = \frac{0,5 * F_{rB}}{Y_B} = \frac{0,5 * 10.283,9 \text{ N}}{1,7} = 3.014,68 \text{ N}$$

Al igual que en la primera iteración, se elige un montaje en X o “face to face” para los rodamientos, y se comprueba en cual de los 3 posibles casos están los rodamientos, como se vio en la figura II.7.3.

Se descarta el caso 1ª porque F_{aB}^R es mayor que F_{aA}^R .

Para que los rodamientos se encuentren en el caso 1b se tiene que cumplir que K_a (fuerza axial que soporta el rodamiento debido al peso) sea mayor que la diferencia de las dos fuerzas axiales inducidas.

Los datos que tenemos son los siguientes:

- $K_a = 38.736,65 \text{ N}$
- $F_{aB}^R - F_{aA}^R = 638,3 \text{ N}$

Por lo que los rodamientos se encuentran, al igual que en la primera iteración, en el caso 1b. Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$F_{aA} = F_{aA}^R = 2.376,38 \text{ N}$$

$$F_{aB} = F_{aB}^R + K_a = 3.014,68 \text{ N} + 38.736,65 \text{ N} = 41.751,33 \text{ N}$$

Con estas cargas se calculan las cargas radiales equivalentes, para ello se compara la fuerza axial entre la fuerza radial y se ve si es menor o igual al valor de e correspondiente a cada rodamiento:

$$\frac{F_{aA}}{F_{rA}} = \frac{2.376,38 \text{ N}}{9030,27 \text{ N}} = 0,263$$

$$\frac{F_{aB}}{F_{rB}} = \frac{41.751,33 \text{ N}}{10.283,9 \text{ N}} = 4,06$$

Para el rodamiento A, como $\frac{F_{aA}}{F_{rA}} < e = 0,31$, la fuerza equivalente F_{eA} es:

$$F_{eA} = F_{rA} = \mathbf{9.030,27 N}$$

Para el rodamiento B, como $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} > e = 0,35$, la fuerza equivalente es:

$$F_{eB} = 0,4 * F_{rB} + Y * F_{aB} = 0,4 * 10.283,9 N + 1,4 * 41.751,33 N \\ = \mathbf{62.565,42 N}$$

Se comprueba que los rodamientos preseleccionados, esta vez, soporten la capacidad de carga básica dinámica:

- Rodamiento A:

$$C_A = F_{eA} * \left(\frac{L_{10}}{10^6}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = 9.030,27 N * \left(\frac{867.240.000 rev}{10^6}\right)^{\frac{1}{3,333}} = 68.743,35 N$$

$$C_{Rodamiento} = 69,3 kN > C_A = 68,74 kN$$

Por tanto, el **rodamiento A** es el **33010/Q**.

- Rodamiento B:

$$C_B = F_{eB} * \left(\frac{L_{10}}{10^6}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = 62.565,42 N * \left(\frac{867.240.000 rev}{10^6}\right)^{\frac{1}{3,333}} = 476.282,15 N$$

$$C_{Rodamiento} = 172 kN * 3 hileras = 516 kN > C_A = 476,28 kN$$

Por tanto, el **rodamiento B** son **3 hileras** del rodamiento **32310 J2/Q**.

El modo de **montaje** de ambos rodamientos será el **ajuste por contracción**. Este método consiste en calentar el alojamiento para el aro exterior y el aro interior para el eje respectivamente con aceite mineral puro con poca corrosividad para dilatar su diámetro inferior a fin de montarlo en el eje. La temperatura de calentamiento durante el montaje no debe superar los 120°C, además, el aro interior puede dilatarse en dirección del eje por lo que es necesario presionarlo contra el collarín hasta que finalice el enfriamiento para evitar la holgura entre el aro interior y el collarín.

7.1. Lubricación

La finalidad de la lubricación del rodamiento es evitar el agarrotamiento por calor mitigando la fricción y la abrasión de la superficie rodante y la superficie de deslizamiento. A continuación se ofrece la explicación detallada:

- **Mitigación de la fricción y la abrasión:** Impide el contacto directo entre la pista, el elemento rodante y la jaula. También mitiga la fricción y la abrasión como resultado del deslizamiento en la superficie de la pista.
- **Eliminación del calor por fricción:** El lubricante elimina el calor de abrasión del interior del rodamiento o el calor propagado desde el interior para evitar el recalentamiento excesivo del rodamiento.
- **Prolongación de la vida útil del rodamiento:** La separación del elemento rodante y la pista mediante una película de aceite mejora la vida útil del rodamiento.
- **Prevención de óxido:** La película de aceite lubricante mitiga la oxidación del interior y la superficie del rodamiento para evitar la corrosión.
- **Prevención de polvo:** La grasa empacada en la caja de lubricación con grasa impide la entrada de materias extrañas.

El rendimiento eficaz de estos efectos requiere la utilización de un método de lubricación adecuado para la aplicación, así como la selección del lubricante apropiado, su cantidad adecuada, prevención contra la entrada de materias extrañas, y estructura de sellado óptima a fin de evitar la fuga del lubricante.

La lubricación empleada es la elastohidrodinámica (EHD), esta puede llevarse a cabo con grasa o con aceite. En la tabla II.7.2 se muestra un resumen de las condiciones más beneficiosas para el uso de grasa y aceite.

Tabla II.7.2: Recomendaciones para cada lubricación

Grasa	Aceite
Temperaturas inferiores a 200°F	Temperaturas elevadas
Velocidades bajas	Velocidades altas
Protección no habitual de la entrada de materia extraña	Facilidad de empleo de sellos a prueba de aceite
Alojamientos simples de los cojinetes	Cojinetes que no resultan adecuados para su lubricación con grasa
Funcionamiento durante periodos prolongados sin proporcionar atención	Cojinete lubricado mediante un sistema de suministro central que también sirva para otras partes de la máquina

Por lo expuesto en la tabla II.7.2 y otras referencias externas, se empleará un **sistema de lubricación con grasa**. Este sistema es más económico debido a su sencilla estructura de sellado y periodo de operación de larga duración con llenado simple.

La grasa deberá empacarse hasta un volumen aproximado de un tercio a la mitad del espacio interno del rodamiento. Un llenado excesivo puede causar la degradación del rendimiento de lubricación debido a la fuga de la grasa ablandada o a la oxidación como resultado del aumento de temperatura en el interior del rodamiento.

En la figura II.7.4 se muestra el esquema del rellenado de grasa empleado, utilizando un aro con orificio de engrase:

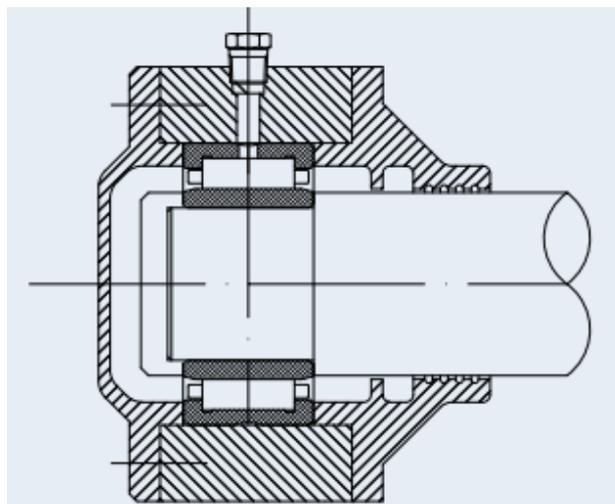


Figura II.7.4: Lubricación de rodamientos con grasa empleando un aro con orificio de engrase



En este sistema, la disposición de los orificios de engrase uniformemente en la circunferencia del aro, permiten la entrada simultánea de la grasa de relleno en el rodamiento para reemplazar la grasa antigua por la nueva. Sin embargo, este diseño también permite que quede grasa antigua en el espacio del lado opuesto, que es necesario que se retire periódicamente quitando la cubierta.

En cuanto a la composición de esta grasa, se trata de un lubricante semisólido compuesto por aceite de base (agente de lubricación líquido) y un espesante, que se combinan al calentarse.



CAPÍTULO III

ESTUDIO ECONÓMICO

ÍNDICE

1. Introducción al estudio económico.....	273
2. Presupuesto	273
3. Financiación	274
4. Ahorros	276
5. Viabilidad económica del proyecto	2775
5.1. Introducción	2775
5.2. Valor Actual Neto (VAN) y Tasa de Rentabilidad Interna (TIR).....	278
5.3. Cálculo del periodo de retorno de la inversión.....	282

1. Introducción al estudio económico

El siguiente estudio económico se limitará a la implementación del púlper y sus instalaciones y elementos complementarios en una fábrica de papel. Se verá desde el punto de vista de ingeniería básica como estudio de viabilidad sin, entrar en detalles más propios de un proyecto de construcción. De este modo, este capítulo tiene cuatro partes bien diferenciadas:

- En la primera parte se detallará el presupuesto desglosado del costo que supone el diseño de la nueva alternativa.
- En la segunda parte se propondrá un modelo de financiación.
- En la tercera parte se verán los ahorros que suponen esta nueva alternativa.
- Finalmente se estudiará la viabilidad económica del proyecto mediante los indicadores económicos VAN y TIR, así como con el cálculo del periodo de retorno de la inversión.

2. Presupuesto

El presupuesto que se enumera en la tabla III.2.1 está desglosado en los diferentes elementos que rodean al púlper además del propio púlper, de forma que se entiendan con claridad los diferentes costos de una instalación de este tipo.

El precio del púlper está influenciado por el motor y los materiales de construcción elegidos y justificados en el capítulo II, así como por el sistema de transmisión de potencia y los rodamientos escogidos.

Tabla III.2.1: Coste total del proyecto

Tipo de elemento	Precio (€)
Púlper	90.000
Púlper auxiliar	20.000
Separador de pesados	2.000
Cinta de alimentación	9.000
Trommel	12.000
Bomba de descarga	6.000
Accionamiento del púlper	8.000
Accionamiento de la bomba	2.000
Instalación eléctrica	30.000
Elementos de regulación automática	7.000
Tuberías (P&I)	5.000
Obra civil	25.000
Ingeniería	3.000
Mano de obra de montaje	20.000
Montaje e instalación mecánica	20.000
Imprevistos	16.000
TOTAL	275.000

3. Financiación

En este apartado se va a presentar una propuesta como modelo de posible financiación, incluida una subvención. La financiación dependerá en cada caso de la política y recursos financieros de cada empresa, así como la subvención estimada en un valor de un 15% del coste total del proyecto, variará en función del momento de su solicitud y de la Comunidad Autónoma.

El modelo de financiación bancaria se basa en condiciones normales que en la actualidad un banco concederá a una empresa del tamaño (y solvencia) de la industria del papel, con un tipo de interés variable del EURIBOR + 1, sin comisiones. Los tres primeros meses sin intereses.

El valor a financiar será, por tanto, un 15% inferior al valor del presupuesto. Se tomará como opción devolver el crédito en 5 años, en 60 cuotas mensuales. Esto se ve resumido en la tabla III.3.1.

Tabla III.3.1: Términos de la financiación

Presupuesto total	275.000
Subvención (15%)	41250
Total a financiar	233.750
Periodo	5 años, 60 cuotas
Intereses (EURIBOR = -0,15%)	0,85%

En la tabla III.3.2 se muestran los resultados de la operación.

Tabla III.3.2: Cálculo de las cuotas e interés de la financiación

Cuota	Tipo de Interés (%)	Cuota sin intereses	Cuota total	Intereses	Capital Pendiente	Coste anual intereses
0	0,00	0,00	0,00	0,00	233750,00	
1	0,00	3895,83	3895,83	0,00	229854,17	
2	0,00	3895,83	3895,83	0,00	225958,33	
3	0,00	3895,83	3895,83	0,00	222062,50	
4	1,35	4024,27	3774,45	249,82	218288,05	
5	1,35	4024,27	3778,70	245,57	214509,36	
6	1,35	4024,27	3782,95	241,32	210726,41	
7	1,35	4024,27	3787,20	237,07	206939,21	
8	1,35	4024,27	3791,46	232,81	203147,75	
9	1,35	4024,27	3795,73	228,54	199352,02	
10	1,35	4024,27	3800,00	224,27	195552,02	
11	1,35	4024,27	3804,27	220,00	191747,75	1º año
12	1,35	4024,27	3808,55	215,72	187939,20	2095,12
13	1,35	4024,27	3812,84	211,43	184126,36	
14	1,35	4024,27	3817,13	207,14	180309,23	
15	1,35	4024,27	3821,42	202,85	176487,81	
16	1,35	4024,27	3825,72	198,55	172662,09	
17	1,35	4024,27	3830,03	194,24	168832,07	
18	1,35	4024,27	3834,33	189,94	164997,74	
19	1,35	4024,27	3838,65	185,62	161159,09	
20	1,35	4024,27	3842,97	181,30	157316,13	
21	1,35	4024,27	3847,29	176,98	153468,84	
22	1,35	4024,27	3851,62	172,65	149617,22	
23	1,35	4024,27	3855,95	168,32	145761,27	2º año
24	1,35	4024,27	3860,29	163,98	141900,99	2253,00
25	1,35	4024,27	3864,63	159,64	138036,36	
26	1,35	4024,27	3868,98	155,29	134167,38	

Cuota	Tipo de Interés (%)	Cuota sin intereses	Cuota total	Intereses	Capital Pendiente	
28	1,35	4024,27	3877,69	146,58	126416,36	
29	1,35	4024,27	3882,05	142,22	122534,31	
30	1,35	4024,27	3886,42	137,85	118647,89	
31	1,35	4024,27	3890,79	133,48	114757,10	
32	1,35	4024,27	3895,17	129,10	110861,94	
33	1,35	4024,27	3899,55	124,72	106962,39	
34	1,35	4024,27	3903,94	120,33	103058,45	
35	1,35	4024,27	3908,33	115,94	99150,12	3º año
36	1,35	4024,27	3912,73	111,54	95237,40	1627,63
37	1,35	4024,27	3917,13	107,14	91320,27	
38	1,35	4024,27	3921,53	102,74	87398,74	
39	1,35	4024,27	3925,95	98,32	83472,79	
40	1,35	4024,27	3930,36	93,91	79542,43	
41	1,35	4024,27	3934,78	89,49	75607,65	
42	1,35	4024,27	3939,21	85,06	71668,44	
43	1,35	4024,27	3943,64	80,63	67724,80	
44	1,35	4024,27	3948,08	76,19	63776,72	
45	1,35	4024,27	3952,52	71,75	59824,20	
46	1,35	4024,27	3956,97	67,30	55867,23	
47	1,35	4024,27	3961,42	62,85	51905,81	4º año
48	1,35	4024,27	3965,88	58,39	47939,94	993,77
49	1,35	4024,27	3970,34	53,93	43969,60	
50	1,35	4024,27	3974,80	49,47	39994,80	
51	1,35	4024,27	3979,28	44,99	36015,53	
52	1,35	4024,27	3983,75	40,52	32031,78	
53	1,35	4024,27	3988,23	36,04	28043,54	
54	1,35	4024,27	3992,72	31,55	24050,82	
55	1,35	4024,27	3997,21	27,06	20053,61	
56	1,35	4024,27	4001,71	22,56	16051,90	
57	1,35	4024,27	4006,21	18,06	12045,69	
58	1,35	4024,27	4010,72	13,55	8034,98	
59	1,35	4024,27	4015,23	9,04	4019,75	5º año
60	1,35	4024,27	4019,75	4,52	0,00	351,29
					Total intereses	7320,81

4. Ahorros

Los ahorros que proporcionará la nueva instalación se van a dividir en dos conceptos diferentes: el ahorro de personal y el ahorro energético.

Para poder evaluar estos dos conceptos se va a comparar la fábrica original con un púlper desactualizado tecnológicamente, con la misma fábrica y condiciones de producción con el nuevo modelo de púlper propuesto.

- **Ahorro de personal:**

Con el púlper de tecnología obsoleta y muy manual eran necesarios dos trabajadores por turno para su manejo, con este nuevo púlper solo es necesario un trabajador por turno. En las fábricas de papel se trabaja con 5 turnos diferentes, por lo que pasamos de necesitar 10 trabajadores a 5.

Estos trabajadores realizan en España 1.691 h/año a un precio para la fábrica de 20€/h, por lo que el ahorro de personal es:

$$5 * 1.691 \frac{h}{año} * 20 \frac{€}{h} = 169.100 \frac{€}{año}$$

- **Ahorro energético:**

Los nuevos equipos son más eficientes, se estima un ahorro respecto a los equipos anteriores de 50 kW·h. La tarifa energética en España está a 0,12€/kW·h y estos equipos trabajan 8.000h/año por lo que el ahorro energético es:

$$8.000 \frac{h}{año} * 50 kW \cdot h * 0,12 \frac{€}{kW \cdot h} = 48.000 \frac{€}{año}$$

5. Viabilidad económica del proyecto

5.1. Introducción

Existen actualmente diversos indicadores económicos para la evaluación empresarial de un proyecto de inversión, que partiendo del flujo de capital entrante y saliente constitutivos de la inversión, es decir, la caja generada por el proyecto cada año, refleja criterios de comparación para decidir si se debe realizar la inversión.

En el presente estudio se va a utilizar el método de la *Tasa de Rentabilidad Interna* (TIR), según el cual se ha de definir un valor umbral de rentabilidad, por debajo del cual se rechazará el proyecto en estudio.

El VAN es el Valor Actual Neto del proyecto de inversión para un determinado coste de oportunidad del promotor, previamente fijado. Este indicador será tomado como referencia. En el supuesto de que éste sea positivo, se llevará a cabo la inversión. En caso contrario se desechará el proyecto.

Otro aspecto importante para el estudio económico es fijar el periodo de amortización de los bienes y la naturaleza de los bienes sobre los que se ha de amortizar. Se considera un **periodo de amortización de 10 años, con un tipo de interés del 5%**.

Como complemento a los anteriores indicadores VAN y TIR, se utilizará el *Periodo de Retorno de la Inversión* (Pay-Back), que se define como el número de años que tarda el flujo de caja o *Cash Flow* acumulado anualmente durante el periodo de amortización, 10 años, en alcanzar los costes de inversión.

5.2. Valor Actual Neto (VAN) y Tasa de Rentabilidad Interna (TIR)

- **Cálculo de los flujos de caja o “cash-flow”**

El ahorro anual obtenido con la nueva propuesta asciende a un total de:

$$\text{Flujo de caja } (Q_i) = 169.100 + 48.000 = 217.100 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- **Cálculo de los indicadores VAN y TIR**

A través de la siguiente expresión, y estableciendo el valor de VAN = 0, se consigue calcular el parámetro “r” (Tasa de Rentabilidad Interna del proyecto).

$$VAN = -INV + \left(\sum_{i=1}^{i=10} \frac{Q_i}{(1+i)^n} \right)$$

Donde:

- INV: valor de la inversión requerida = 275.000 €

- Q_i : flujo de caja del año correspondiente = 217.100 €
- i : tipo de interés medio = 5%.
- n : periodo de amortización = 10 años.

Conocidos todos estos valores, el resultado es el siguiente:

$$VAN = 140.138.911€ > 0$$

Para realizar el cálculo de la Tasa de Rentabilidad Interna (TIR), se iguala a cero el valor del Valor Actual Neto, de forma que:

$$VAN = -INV + \left(\sum_{i=1}^{i=10} \frac{Q_i}{(1+r)^n} \right)$$

Dónde el parámetro “r” es la Tasa de rentabilidad Interna del proyecto. En este proyecto se calculará el valor exacto del indicador TIR, sin embargo, dada la dificultad para despejar “r” de la expresión anterior, se suelen utilizar ciertos criterios de aproximación para estimar su valor, de forma que estas aproximaciones también serán calculadas.

- La siguiente expresión, llamada del “**Vencimiento Medio**”, proporciona una aproximación por defecto, es decir, que el verdadero valor de “r” es inferior del que resulta de aplicarla.

$$r' = \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i}{A} \right)^z - 1$$

Donde “z” se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i}{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i \cdot i}$$

Dado que Q_i no varía, el término del numerador es el siguiente:

$$\sum_{i=1}^{i=10} Q_i = Q_i * 10 = 217.000 * 10 = 2.170.000$$

El denominador es el resultado del sumatorio como vemos en la tabla III.4.1

Tabla III.4.1: Cálculo de $Q_i \cdot i$ para obtener el valor de Z

i	$Q_i \cdot i$
1	217100
2	434200
3	651300
4	868400
5	1085500
6	1302600
7	1519700
8	1736800
9	1953900
10	2171000
$\sum_{i=1}^{i=10} Q_i \cdot i$	11940500

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i}{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i \cdot i} = \frac{2.170.000}{11.940.500} = 0,182$$

Por tanto:

$$r' = \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i}{A} \right)^Z - 1 = \left(\frac{2.171.000}{275.000} \right)^{0,182} - 1 = 0,456 = \mathbf{45,6\%}$$

- Otra expresión, en este caso **por exceso** es:

$$r'' = \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i}{A} \right)^Y - 1$$

Donde “Y” se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} \frac{Q_i}{i}}{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i}$$

El numerador le obtenemos del sumatorio realizado en la tabla III.4.2.

Tabla III.4.2: Cálculo de $\frac{Q_i}{i}$ para obtener el valor de Y

i	Qi/i
1	217100
2	108550
3	72366,6
4	54275
5	43420
6	36183,3
7	31014,2
8	27137,5
9	24122,2
10	21710
$\sum_{i=1}^{i=10} \frac{Q_i}{i}$	635879

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} \frac{Q_i}{i}}{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i} = \frac{635.879}{2.170.000} = 0,293$$

Por tanto:

$$r'' = \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=10} Q_i}{A} \right)^Y - 1 = \left(\frac{2.171.000}{275.000} \right)^{0,293} - 1 = 0,832 = \mathbf{83,2\%}$$

Esto quiere decir que el verdadero tipo de descuento que hace el VAN igual a cero se encontrará comprendido entre un 45,6% y un 83,2%.

Finalmente, operando la ecuación numéricamente, de manera iterativa, se consigue el siguiente resultado del indicador TIR, que se encuentra entre los valores por exceso y por defecto calculados:

$$\mathbf{TIR = 79\%}$$

5.3. Cálculo del periodo de retorno de la inversión

Para terminar el capítulo, se mostrará el Periodo de Retorno de la Inversión (Pay-Back), para ello es necesaria la construcción de la *Tabla III.4.3*, donde se muestran los flujos de caja anuales y acumulados a lo largo del período de amortización.

Tabla III.4.3: Flujos de caja y acumulados a lo largo del periodo de amortización

Año	Flujo de Caja	Flujo Acumulado
0		-275.000
1	217.100	-57.900
2	217.100	159.200
3	217.100	376.300
4	217.100	593.400
5	217.100	810.500
6	217.100	1.027.600
7	217.100	1.244.700
8	217.100	1.461.800
9	217.100	1.678.900
10	217.100	1.896.000

En la Figura III.4.1 se puede ver la tabla III.4.3 representada de forma gráfica. El tiempo de amortización corresponde con el punto de corte con el eje de abscisas.

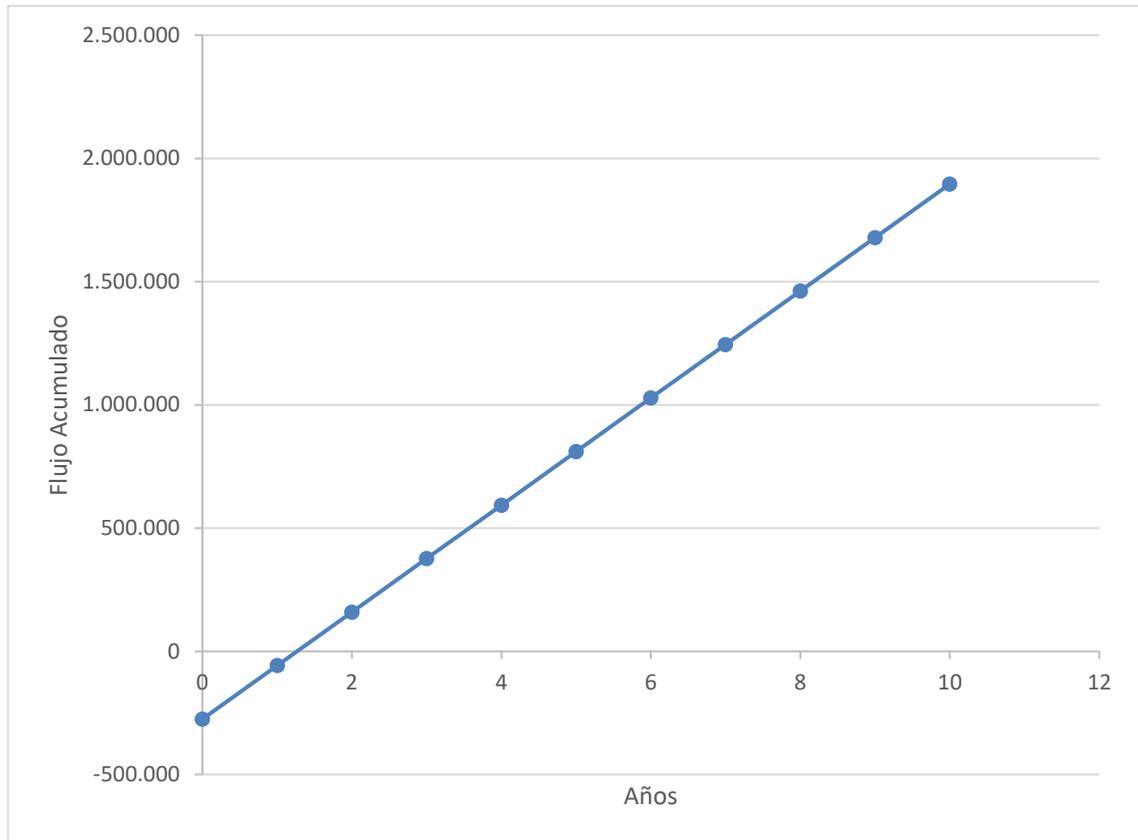


Figura III.4.1: Representación gráfica del PayBack

$$\begin{aligned}
 \text{PayBack} &= \left[\frac{\text{Período Último con Flujo}}{\text{Acumulado Negativo}} \right] \\
 &+ \left[\frac{\text{Valor Absoluto del Último Flujo Acumulado Negativo}}{\text{Valor del Flujo de Caja en el Siguiete Período}} \right] = 1 + \frac{|-57.900|}{217.100} \\
 &= \mathbf{1,27 \text{ años}}
 \end{aligned}$$

El periodo de retorno de la inversión es de 1 año y 4 meses.



CAPÍTULO IV PLIEGO DE CONDICIONES

CAPÍTULO I: DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1. Trabajos objeto del presente proyecto

Artículo 2. Trabajos y obras accesorios no especificados en el pliego.

Artículo 3. Documentos que definen la modificación en la fabricación

Artículo 4. Compatibilidad y relación entre los documentos

Artículo 5. Director de fabricación

Artículo 6. Disposiciones a tener en cuenta

CAPITULO II: PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

Artículo 7. Replanteo

Artículo 8. Instalación eléctrica

Artículo 9. Instalaciones de protección

Artículo 10. Instalaciones de Seguridad y Accesibilidad

CAPITULO III: PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS

Epígrafe I: OBLIGACIONES Y DERECHOS DEL CONTRATISTA

Artículo 11: Reclamaciones contra las órdenes de dirección

Artículo 12. Despido por insubordinaciones, incapacidad y mala fe

Artículo 13. Copia de los documentos

Epígrafe II: TRABAJO, MATERIALES Y MEDIOS AUXILIARES

Artículo 14. Libro de órdenes

Artículo 15. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución

Artículo 16. Condiciones generales de ejecución de los trabajos

Artículo 17. Trabajos defectuosos

Artículo 18. Materiales no utilizables o defectuosos

Epígrafe III: RECEPCIÓN Y LIQUIDACIÓN

Artículo 19. Asistencia del cliente a la FAT

Artículo 20. Puesta en marcha, SAT y formación

Artículo 21. Planificación del servicio.

Artículo 22. Alcance de suministro

Artículo 23. Servicios de cualificación del proyecto

Artículo 24. Documentación de la cualificación del sistema

Artículo 25. Ejecución IQ/OQ

Artículo 26. Documentación de validación del software

Artículo 27. Documentación de validación del software.

Artículo 28. Documentación de la cualificación del sistema

Artículo 29. Extensión de la FAT

Artículo 30. Adaptación de protocolos de documentación

Epígrafe IV: TÉRMINOS Y CONDICIONES

Artículo 31. Responsabilidades del cliente

Artículo 32. Condiciones de pago

Artículo 33. Plazos de entrega

Artículo 34. Penalizaciones

Artículo 35. Garantía

Artículo 36. Servicio post-venta

Artículo 37. Regulación de doble uso

Artículo 38. Seguridad

Artículo 39. Seguros y responsabilidad

Artículo 40. Fuerza mayor



- Artículo 41. Cancelación
- Artículo 42. Terminación
- Artículo 43. Ley aplicable
- Artículo 44. Arbitraje
- Artículo 45. Nulidad
- Artículo 46. Renuncia
- Artículo 47. Efecto vinculante, asignación
- Artículo 48. Personal del proveedor
- Artículo 49. Limpieza de obras y medio ambiente
- Artículo 50. Confidencialidad
- Artículo 51. Terminación
- Artículo 52. Cesión
- Artículo 53. Otras disposiciones
- Artículo 54. Recepciones provisionales
- Artículo 55. Recepción definitiva
- Artículo 56. Liquidación final
- Artículo 57. Liquidación en caso de rescisión

Epígrafe V: FACULTADES DE LA DIRECCIÓN DE FABRICACIÓN

- Artículo 58. Facultades de la Dirección de Fabricación

CAPITULO IV: PLIEGO DE CONDICIONES ECONÓMICAS

Epígrafe I: BASE FUNDAMENTAL

- Artículo 59. Base fundamental

Epígrafe II: GARANTÍAS DE CUMPLIMIENTO Y FIANZAS

Artículo 60. Garantías

Artículo 61. Fianzas

Artículo 62. Devolución de la fianza

Epígrafe III: PRECIOS Y REVISIONES

Artículo 63. Precios contradictorios

Artículo 64. Reclamaciones de aumento de precios

Artículo 65. Revisión de precios

Artículo 66. Elementos comprendidos en el presupuesto

Epígrafe IV. VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS

Artículo 67. Valoración de los trabajos

Artículo 68. Mediciones parciales y finales

Artículo 69. Equivocación en el presupuesto

Artículo 70. Valoración de obras incompletas

Artículo 71. Carácter provisional de las liquidaciones parciales

Artículo 72. Pagos

Artículo 73. Suspensión por retrasos de pagos

Artículo 74. Indemnización por retraso de los trabajos

Artículo 75. Indemnización por daños de causa mayor al contratista

Epígrafe V. VARIOS

Artículo 76. Mejoras de obras

CAPÍTULO I: DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1. Trabajos objeto del presente proyecto

Se considerarán sujetos a las condiciones de este Pliego, todos los trabajos característicos, planos y presupuestos, que se adjuntan en las partes correspondientes del presente Proyecto, así como todas las obras necesarias para dejar completamente terminados los equipos e instalaciones con arreglo a los planos y documentos adjuntos.

Se entiende por trabajos accesorios, aquellos que por su naturaleza, no pueden ser previstos en todos sus detalles, sino a medida que avanza la ejecución de los trabajos.

Los trabajos accesorios o adaptaciones del área de producción, se construirán según se vaya conociendo su necesidad. Cuando su importancia lo exija se construirán en base a los proyectos adicionales que redacten. En los casos de menor importancia se llevarán a cabo conforme la propuesta que formule la Dirección de Fabricación.

Artículo 2. Trabajos y obras accesorios no especificados en el pliego.

Si en el transcurso de los trabajos se hiciese necesario ejecutar cualquier clase de obras o instalaciones que no se encuentren descritas en este Pliego de Condiciones el Adjudicatario estará obligado a realizarlas con escrita sujeción a las órdenes que a tal efecto reciba de la Dirección de Fabricación, y en cualquier caso, con arreglo a las reglas del buen arte constructivo.

La Dirección de Fabricación tendrá plenas atribuciones para sancionar la idoneidad de los sistemas empleados, los cuales estarán expuestos para su aprobación de forma que, a su juicio, las obras o instalaciones que resulten defectuosas total o parcialmente, deben ser demolidas, desmostadas o recibidas en su totalidad o en parte, sin que dé derecho a ningún tipo de reclamación por parte del Adjudicatario.

Artículo 3. Documentos que definen la modificación en la fabricación

Los documentos que definen la fabricación y que la propiedad entregue al Contratista, pueden tener carácter contractual o meramente informativo.

Son documentos contractuales los Planos, Pliego de Condiciones y Presupuestos que se incluyen en el presente Proyecto.

Cualquier cambio en el planteamiento de la fabricación que implique un cambio sustancial respecto de lo proyectado deberá ponerse en conocimiento de la Dirección de Técnica para que lo apruebe, si procede, y redacte el oportuno proyecto reformado.

Artículo 4. Compatibilidad y relación entre los documentos

En caso de contradicción entre los Planos y el Pliego de Condiciones, prevalecerá lo prescrito en este último documento. Lo mencionado en los Planos y omitido en el Pliego de Condiciones o viceversa, habrá de ser ejecutado como si estuviera expuesto en ambos documentos.

Artículo 5. Director de fabricación

La propiedad nombrará en su representación a un Técnico Titulado, en quién recaerán las labores de dirección, control y vigilancia de la fabricación del presente Proyecto. El Contratista proporcionará toda clase de facilidades para que la Dirección de Fabricación, o sus subalternos, puedan llevar a cabo su trabajo con el máximo de eficiencia.

No será responsable ante la propiedad de la tardanza de los Organismos competentes en la tramitación del Proyecto. La tramitación es ajena al Director, quien una vez conseguidos todos los permisos, dará la orden de comenzar la fabricación de la máquina.

Artículo 6. Disposiciones a tener en cuenta

- Instrucciones EAE de acero estructural, corrección de errores aprobada en Real Decreto 1247/2008, de 18 de Julio.

- Reglamentos y Normas de Ensayo de Laboratorio Central del Ministerio de Fomento.
- Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT aprobado por, Real Decreto 223/2008, de 15 de Febrero.
- Reglamento Electrónico de Baja Tensión y sus instrucciones Técnicas Complementarias aprobado por Real Decreto 842/2002, de 2 de Agosto.
- Directiva Europea sobre Máquinas 2006/42/EC.

CAPITULO II: PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

Artículo 7. Replanteo

Antes de dar comienzo la fabricación, la Dirección de la fabricación, auxiliado del personal subalterno necesario y en presencia del Contratista o de su representante, procederá al replanteo general de la fabricación. Una vez finalizado el mismo se levantará acta de comprobación del replanteo.

Artículo 8. Instalación eléctrica

Los materiales y ejecución de la instalación eléctrica cumplimentarán lo establecido en el Reglamento Electrotécnico de Alta y Baja Tensión y las Instrucciones Complementarias de dicho reglamento MIBT.

Artículo 9. Instalaciones de protección

Se refiere el presente artículo a las condiciones de ejecución, de los materiales de control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento, relativas a las instalaciones de protección contra fuegos y rayos.

Artículo 10. Instalaciones de Seguridad y Accesibilidad

Se refiere el presente artículo a las condiciones de ejecución, de los materiales de control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento, relativas a las instalaciones de protección contra fuegos y rayos.

CAPITULO III: PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS

Epígrafe I: OBLIGACIONES Y DERECHOS DEL CONTRATISTA

Artículo 11: Reclamaciones contra las órdenes de dirección

Las reclamaciones que el Contratista quiera hacer contra las órdenes emanadas de la Dirección de Fabricación, solo podrá presentarlas a través del mismo ante la propiedad, si ellas son de orden económico y de acuerdo con las condiciones estipuladas en los Pliegos de Condiciones correspondientes.

Contra disposiciones de orden técnico o facultativo de la Dirección de Fabricación, no se admitirá reclamación alguna, pudiendo el Contratista salvar su responsabilidad, si lo estima oportuno, mediante exposición razonada, dirigida al Director, el cual podrá limitar su contestación al acuse de recibo que, en todo caso, será obligatorio para este tipo de reclamaciones.

Artículo 12. Despido por insubordinaciones, incapacidad y mala fe

Por falta del cumplimiento de las instrucciones de la Dirección de Fabricación o sus subalternos de cualquier clase, encargados de la vigilancia de la fabricación; por manifiesta incapacidad o por actos que comprometan y perturben la marcha de los trabajos, el Contratista tendrá obligación de sustituir a sus dependientes y operarios, cuando la Dirección de Fabricación lo reclame.

Artículo 13. Copia de los documentos

El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa, de los Pliegos de Condiciones, presupuestos y demás documentos de la contrata. La Dirección de Fabricación, si el Contratista solicita estos, autorizará las copias después de contratada la fabricación.

Epígrafe II: TRABAJO, MATERIALES Y MEDIOS AUXILIARES

Artículo 14. Libro de órdenes

En la casilla y oficina de Producción, tendrá el Contratista el Libro de Ordenes, en el que se anotará las que la Dirección de Fabricación precise dar en el transcurso de la fabricación. El cumplimiento de las órdenes expresadas en dicho Libro es tan obligatorio para el Contratista como las que figuren en el Pliego de Condiciones.

Artículo 15. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución

Obligatoriamente y por escrito, deberá el Contratista dar cuenta al Director del comienzo de los trabajos, antes de transcurrir veinticuatro horas de su iniciación: previamente se habrá suscrito el acta de replanteo en las condiciones establecidas en el artículo 7.

El adjudicatario comenzará la fabricación dentro del plazo de 15 días desde la fecha de adjudicación. Dará cuenta al Director, mediante oficio, del día en que se propone iniciar los trabajos, debiendo estar acuse de recibo.

La fabricación quedará terminada dentro del plazo establecido.

El Contratista está obligado al cumplimiento de todo cuanto se dispone en la Reglamentación Oficial del Trabajo.

Artículo 16. Condiciones generales de ejecución de los trabajos

El Contratista, como es natural, debe emplear los materiales y mano de obra que cumplan con las condiciones exigidas en las “Condiciones Generales de índole Técnica” del “Pliego General de Condiciones Varias de la Producción” y realizará todos y cada uno de los trabajos contratados de acuerdo con lo especificado también en dicho documento.

Por ello, y hasta que tenga lugar la recepción definitiva de la máquina, el Contratista es el único responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas u defectos que en estos pueden existir, por su mala ejecución o por la deficiente calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que pueda servirle de excusa ni le otorgue derecho alguno, la circunstancia de que la Dirección de Fabricación o sus subalternos no le

hayan llamado la atención sobre el particular, no tampoco el hecho de que hayan sido valorados en las certificaciones parciales de la obra que siempre se supone que se extienden y abonan a buena cuenta.

Artículo 17. Trabajos defectuosos

Como consecuencia de lo anteriormente expresado, cuando la Dirección de Fabricación o su representante en taller adviertan vicios o defectos en los trabajos ejecutados, o que los materiales empleados, o los aparatos colocados no reúnen las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de la ejecución de los trabajos, o finalizados estos y antes de verificarse la recepción definitiva de la máquina, podrán disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas de acuerdo con lo contratado, y por ello a expensas de la contrata. Si esta no estimase justa la resolución y se negase a la demolición y reconstrucción ordenadas, se procederá de acuerdo con lo establecido en el artículo 18.

Artículo 18. Materiales no utilizables o defectuosos

No se procederá al empleo y colocación de los materiales y de los aparatos sin que antes sean examinados y aceptados por la Dirección de Obra, en los términos que prescriben los Pliegos de Condiciones, depositando al efecto del Contratista, las muestras y modelos necesarios, previamente contraseñados, para efectuar con ellos comprobaciones, ensayos o pruebas preceptuadas en el Pliego de Condiciones, vigente en la máquina.

Los gastos que ocasionen los ensayos, análisis, pruebas, etc., antes indicados serán a cargo del Contratista.

Cuando los materiales o aparatos no fueran de la calidad requerida o no estuviesen perfectamente preparados, la Dirección de Fabricación dará orden al Contratista para que los reemplace por otras que se ajusten a las condiciones requeridas en los Pliegos, o falta de estos, a las órdenes de la Dirección de Fabricación.

Epígrafe III: RECEPCIÓN Y LIQUIDACIÓN

Artículo 19. Asistencia del cliente a la FAT

Como opción e independientemente del resto de servicios asociados, el proyecto contempla la asistencia del cliente durante la FAT en las instalaciones de fabricación, antes de la entrega del equipo.

El responsable del proyecto atenderá a una representación del cliente de dos (2) personas por un periodo no superior a una (1) semana por equipo, en función de las especificaciones finales de la unidad.

A petición del cliente, se puede ampliar el servicio en días asignados, pruebas adicionales a realizar o número de asistentes. Se deberá informar previamente para acordar una propuesta comercial.

Artículo 20. Puesta en marcha, SAT y formación

El servicio de puesta en marcha comprende diversas tareas para garantizar que el equipo se encuentra en condiciones correctas para funcionar, como los montajes mecánico y eléctrico, el ajuste y la verificación de funcionamiento contra un protocolo SAT (Prueba de Aceptación en Planta).

Artículo 21. Planificación del servicio.

Habitualmente las tareas de puesta en marcha las realiza un técnico especializado y un ingeniero durante un periodo de entre una y dos semanas. La planificación definitiva del servicio depende de las especificaciones finales del equipo.

El contratista ejecutará los protocolos SAT estándar, que incluyen la comprobación de las líneas de suministro y verificación de las funciones del equipo, como son los modos de operación, ciclos auxiliares, capacidades, alarmas, etc.

Se incluye una sesión de formación al personal del cliente sobre las funciones de operación y mantenimiento del equipo.

Artículo 22. Alcance de suministro

Las tareas de puesta en marcha se inician una vez el equipo ha sido ubicado en su emplazamiento final, y el cliente ha completado y entregado el formulario de instalación.

El precio incluye la ejecución del servicio, viajes, hotel y dietas para el personal técnico asignado, durante el período de tiempo que comprende el servicio.

Cualquier retraso que comporte tiempo extra para el técnico por causas ajenas a la Dirección de Fabricación se cargará separadamente.

Por cualquier causa ajena a la Dirección de Fabricación que suponga un retraso mayor a tres días laborables, la Dirección de Fabricación se reserva el derecho de hacer volver al personal técnico, cargando adicionalmente los gastos de una siguiente visita.

A petición del cliente se puede ampliar el servicio de formación del personal. Se deberá informar previamente para acordar una propuesta comercial.

Artículo 23. Servicios de cualificación del proyecto

Los Servicios de Cualificación del Proyecto suponen una evidencia documentada de que el equipo ha sido diseñado, instalado y funciona según los requerimientos específicos del cliente (URS), de acuerdo a las recomendaciones de la GAMP 5 y cGMP.

A petición del cliente, puede ofrecer un servicio parcial o completo de la cualificación.

Artículo 24. Documentación de la cualificación del sistema

En referencia a la documentación, el servicio de cualificación del proyecto ofrece las siguientes opciones:

QPP, FS, DQ y FAT: generación y entrega del Plan de Cualificación del Proyecto (QPP), Especificaciones Funcionales (FS) y generación de los protocolos de Cualificación del Diseño (DQ) y Test de Aceptación en Fábrica (FAT), que serán tratados y ejecutados por el responsable del proyecto. El Plan de Cualificación del Proyecto (QPP) detalla la documentación del proceso y su cumplimiento según GAMP 5.

QPP, FS, DQ, FAT y protocolos IQ/OQ: idéntico a los incluidos anteriormente, pero incluyendo la generación de los protocolos IQ/OQ, que se entregarán a cliente para su aprobación.

Adicionalmente, se puede requerir la ejecución de estos protocolos.

Artículo 25. Ejecución IQ/OQ

Complementariamente a la Documentación de la Cualificación del Sistema los protocolos IQ/OQ pueden ser ejecutados por personal a cargo de la Dirección de Fabricación en las instalaciones del cliente.

La ejecución en planta de los protocolos estándar IQ/OQ está prevista que se realice por uno (1) de nuestros ingenieros especializados, durante una extensión de entre una a dos (1 a 2) semanas. La planificación definitiva del servicio depende de las especificaciones finales del equipo.

Se incluye la ejecución del servicio, viajes, hotel y dietas para el personal técnico asignado, durante período de tiempo que comprende el servicio. Se incluye también la generación y aprobación de la documentación asociada.

Cualquier retraso que comporte tiempo extra para nuestro técnico por causas ajenas a la Dirección de Fabricación se cargará separadamente.

Por cualquier causa ajena a Dirección de Fabricación que suponga un retraso mayor a tres (3) días laborables, la Dirección de Fabricación se reserva el derecho de hacer volver al personal técnico, cargando adicionalmente los gastos de una siguiente visita.

Artículo 26. Documentación de validación del software

El paquete de Validación del Software consiste en un sistema cerrado basado en documentación de diseño y verificación del software.

Este servicio incluye la generación de la documentación necesaria para definir y especificar el diseño y pruebas de verificación de todos los módulos que conforman el software, según la normativa GAMP 5 referente a Paquetes de Software Configurables Categoría 5.

Se documentará la implementación de herramientas y métodos de trabajo.

Artículo 27. Documentación de validación del software.

Diseño de Software y Pruebas: Esta fase establece y mantiene un sistema formal para controlar la producción de software, revisión y pruebas. La aplicación, métodos y herramientas deben ser utilizadas y debidamente documentadas.

Las partes principales de este paquete de documentación son las siguientes:

Especificaciones de Diseño de Software (SDS): Define el software de los subsistemas que forman el sistema de software completo, y las interfaces entre los subsistemas.

Módulos de Software Especificaciones de Diseño (SMDS): Esto se produce para cada sub-sistema de software (módulos) identificados en las especificaciones del software de diseño como de categoría 5 de GAMP 5. El SMDS debe contener información suficiente para permitir la codificación del módulo para poder funcionar. Después de la codificación y prueba de módulos, el SMDS puede requerir una actualización con los detalles de implementación necesarios para el mantenimiento de software.

Módulo de Software de Pruebas de las Especificaciones (SMTS): Esto se produce en correlación con cada especificación de software para diseño de módulos. Las pruebas de módulo de software que se llevarán a cabo deben asegurar que el módulo de software cumple sus especificaciones.

La revisión de código: Esto asegura que el software ha sido debidamente revisado siguiendo los procedimientos establecidos cuando el software se construye. La revisión se comprueba si el software cumple con las intenciones predefinidas de diseño y define los estándares de programación. Todas las cuestiones observadas durante la revisión del código serán documentadas y corregidas y el programa se volverá a compilar antes del inicio de la prueba de la unidad.

Prueba de la unidad: Demuestra que el diseño aplicado se ajusta a los requisitos de la FS y las especificaciones de diseño relevantes.

Artículo 28. Documentación de la cualificación del sistema

Plan de Cualificación del Proyecto (QPP): el propósito del Plan de la Cualificación del Proyecto consiste en definir de forma precisa la documentación, procedimientos y pruebas de verificación y cualificación del equipo, así como definir las responsabilidades del personal implicado. Tras aceptación del pedido, se genera y entrega a cliente el QPP para su uso como guía de entendimiento del alcance del servicio, permitiéndole ser una parte activa en la toma de decisiones.

Especificaciones Funcionales (FS): las Especificaciones Funcionales trasladan los requerimientos del equipo a cómo se alcanza su cumplimiento. Deben ser suficientemente explícitas como para permitir su aplicación en la fabricación del equipo. Requieren aprobación del cliente para continuar con la siguiente fase de producción.

Especificaciones de Diseño (DQ): protocolo aportado por el departamento de Aseguramiento de Calidad, que debe ser entregado al cliente por parte del responsable del proyecto para revisión y aprobación. La intención de la DQ es aportar evidencia documentada que el equipo ha sido diseñado según los Requerimientos de Usuario (URS) y las normativas aplicables.

Prueba de Aceptación en Fábrica (FAT): la FAT consiste en verificar en fábrica el estricto cumplimiento del equipo según los URS y/o Especificaciones Funcionales indicadas en la oferta.

Cualificación de la Instalación (IQ): esta fase se ejecuta en planta del cliente por un ingeniero especializado, para comprobar que el equipo ha sido instalado correctamente de acuerdo a unos requerimientos específicos, según la documentación.

Calibración: Los instrumentos de medida y control, así como el lazo de corriente, salen calibrados de fábrica. No obstante, si los servicios de cualificación se realizan más tarde del alcance de los certificados de calibración, el cliente deberá responsabilizarse de la re-calibración de los mismos.

Cualificación de la Operación (OQ): esta fase se ejecuta en planta del cliente por un ingeniero especializado, para comprobar que los parámetros de funcionamiento del equipo satisfacen las condiciones verificadas en las pruebas y que en cada caso se cumple el criterio establecido de aceptación.

Cualificación de la Prestación (PQ): Una vez concluida la OQ, el equipo está preparado para la validación del proceso por el cliente. Antes de proceder a la PQ, el cliente debe haber desarrollado la receta del proceso para alcanzar resultados satisfactorios, tanto desde el punto de vista de calidad como de producción. Teniendo esto en cuenta, se inicia la validación del proceso que consiste en confirmar que los parámetros del proceso se alcanzan consistentemente durante el ciclo, según procedimientos definidos por regulaciones y normativas.

La Documentación de Cualificación del Sistema no incluye la PQ, que es responsabilidad exclusiva del cliente.

Artículo 29. Extensión de la FAT

La FAT será dirigida por un responsable de proyecto, ayudado por un equipo a cargo del mismo, con asistencia de hasta tres (3) representantes del cliente. La FAT se realiza en las instalaciones del cliente y consiste en la verificación, a través de una inspección estricta, del cumplimiento de las

especificaciones del equipo respecto a los Requerimientos de Usuario (URS) y Especificaciones Funcionales y de Diseño (FS/DS).

A petición del cliente, se puede extender este servicio en el número de asistentes a la FAT, duración de la planificación o integración de pruebas no incluidas. Se deberá informar previamente para acordar una propuesta comercial.

Artículo 30. Adaptación de protocolos de documentación

Habitualmente, el servicio de cualificación se realiza de acuerdo a unos protocolos pre-establecidos que se personalizan para cada proyecto.

A petición del cliente, se puede adaptar la generación y ejecución de estos protocolos según un criterio específico propio. Se deberá informar previamente para acordar una propuesta comercial. Cambios en el formato de la documentación y pruebas a realizar pueden suponer modificaciones económicas o afectar a la planificación del proyecto.

Epígrafe IV: TÉRMINOS Y CONDICIONES

Artículo 31. Responsabilidades del cliente

Revisar la mercancía a la recepción, comprobar la recepción de cada uno de los elementos del “packing list” así como el estado físico de todos ellos.

En el caso de detectar cualquier irregularidad, informar en el plazo de 48 horas al tomador del seguro; si se supera ese tiempo, la compañía de seguros podría no cubrir los daños ocasionados durante el transporte.

La Dirección de Fabricación no se hará responsable de reparaciones o modificaciones de partes dañadas del equipo o accesorios causados por el transporte, pues éstos deben estar cubiertos por la compañía aseguradora.

Artículo 32. Condiciones de pago

Facturación:

30% del importe total con el pedido mediante transferencia bancaria;

30% a la mitad de la fabricación;

40% después del FAT en las instalaciones del cliente, entrega y validación.

Forma de pago:

Mediante transferencia bancaria.

Artículo 33. Plazos de entrega

El tiempo de entrega es de 6 meses. A confirmar en el momento del pedido.

El inicio del plazo de entrega se entenderá a partir del día en que hayan definido y aceptado todas las condiciones comerciales y los detalles técnicos y que la Dirección de Técnica haya recibido la totalidad del importe del primer pago acordado.

Las modificaciones solicitadas por el comprador a partir de este plazo pueden tener como consecuencia una prolongación del plazo de entrega, la cual será justificada y comunicada por escrito.

Artículo 34. Penalizaciones

Penalización de 0,8% por semana hasta un máximo de un 8% sobre la fecha de arranque.

Artículo 35. Garantía

La Dirección de Fabricación garantiza el buen funcionamiento de la instalación, así como la calidad original de los materiales y componentes empleados en la misma.

Esta garantía tiene un plazo de duración de 12 meses a partir de la aceptación de la puesta en marcha o 18 meses desde el envío, lo que suceda antes.

La garantía cubre la sustitución o reparación del elemento defectuoso y la mano de obra necesaria para ello. Los gastos de desplazamiento y estancia del personal, así como el transporte de materiales, serán a cargo del cliente.

La Dirección de Fabricación vendrá obligada a subsanar todo vicio de funcionamiento proveniente de algún defecto en el diseño, en los materiales o en su fabricación, con las siguientes limitaciones:

- Las reparaciones efectuadas parcialmente durante el periodo de garantía, no darán lugar a ninguna prolongación global en el plazo de la misma.

- Quedan excluidas de la obligación de garantía todas aquellas piezas cuyo deterioro haya sido ocasionado por la negligencia en el uso, falta de los habituales cuidados de conservación, desgaste natural, inexperiencia del personal que use o manipule las máquinas o instalaciones, corrosión por agentes químicos empleados, montaje incorrecto de piezas, modificaciones o reparaciones inadecuadas hechas por el comprador sin autorización por escrito de la Dirección de Fabricación.

- La obligación de garantía de la parte vendedora no será exigible en el caso de que el defecto provenga de los trabajos o modificaciones realizadas en el equipo por el comprador.

- La garantía no incluye el suministro de cualquier consumible: aceites, fluidos térmicos y refrigerantes, gases, filtros ni sondas de medida.

- Para que la garantía sea válida deben cumplirse las siguientes condiciones:

- Que se contrate nuestro servicio de puesta en marcha y formación.

- Que no hayan transcurrido más de 6 meses entre el envío del equipo y la aceptación de la puesta en marcha.

- Que el comprador haya cumplido las obligaciones de pago.

La Dirección de Fabricación no vendrá obligada a cumplir con su obligación de garantía cuando el comprador no haya cumplido con cualquiera de las obligaciones contractuales acordadas.

El equipo está garantizado contra cualquier defecto de fabricación o de diseño y vicio oculto según los siguientes términos:

La garantía está expresamente limitada a que la Dirección de Fabricación asume a su discreción la sustitución o reparación, o la organización de la sustitución o reparación por parte de un representante autorizado, de cualquier equipo suministrado o trabajo realizado para el cliente, reconocido defectuoso por la Dirección de Fabricación. En caso de reparación, la Dirección de Fabricación podrá a discreción realizarla en las instalaciones del cliente, en sus propias instalaciones, o de un tercero. La garantía no cubre los daños que resulten de la inobservancia de las instrucciones de uso que figuran en el manual suministrado con cada equipo o los daños que resultan del desgaste normal, falta de o inadecuado mantenimiento, modificación, reparación o sustitución del equipo llevada a cabo sin autorización de la Dirección Técnica o desplazamiento del equipo. La garantía solamente aplica a condición de pago completo del equipo y siempre que:

(a) en opinión de la Dirección Técnica, el equipo haya sido comprado y utilizado para un fin para el que resultaba adecuado, se haya utilizado y realizado el mantenimiento de acuerdo con las instrucciones de funcionamiento estipulados por la Dirección de Fabricación, no se haya utilizado de un modo no apropiado y no se haya sobreutilizado;

(b) la reclamación se notifique por escrito a la Dirección de Fabricación en un plazo de 10 días desde el hallazgo del defecto y, si la dirección Técnica así lo exige, se devuelva a la Dirección de Fabricación el equipo o pieza defectuosa o se entregue a su representante autorizado con el transporte, el seguro y todas las cargas pagadas;

(c) el defecto del equipo se produzca en un plazo de dieciocho meses desde el envío o de doce meses desde la instalación realizada por la Dirección Técnica, lo que ocurra en primer lugar;

(d) el equipo no haya sido reparado o modificado por nadie que no sea responsabilidad de la Dirección de Fabricación o un tercero autorizado por la Dirección Técnica;

(e) en el caso de equipo o piezas que no sean de su propia fabricación, la responsabilidad de la Dirección de Fabricación se limitará a proporcionar al cliente el beneficio de cualquier garantía proporcionada a la Dirección de Fabricación por parte del fabricante de dicho equipo o pieza;

(f) en el caso de una reclamación en referencia al trabajo realizado in situ, la responsabilidad de la Dirección de Fabricación se limitará a sustituir los materiales defectuosos y a subsanar cualquier defecto causado por error

o negligencia de la Dirección Técnica y, en cualquier caso, siempre dentro de un plazo de seis meses desde la realización del trabajo.

(g) un responsable del cliente y el personal encargado de la conducción del equipo haya finalizado integralmente la asistencia a las operaciones de demostración.

La Dirección Técnica tendrá el derecho a solicitar una inspección previa del equipo defectuoso para evaluar si se está bajo la cobertura de la garantía.

Las piezas reemplazadas seguirán siendo la propiedad de la Dirección de Fabricación y bajo ningún concepto se considerará que las reparaciones realizadas extienden la garantía.

El compromiso de garantía es personalísimo para el cliente y termina en el momento que ceda el equipo.

Durante la garantía los gastos relacionados con el transporte de materiales, el desplazamiento de personal y gastos de alojamiento serán a cargo del cliente.

Ninguna devolución de material o equipo será aceptada sin el previo consentimiento de la Dirección Técnica.

El cliente acepta que las garantías y condiciones expresadas en las presentes condiciones se aplican al presente contrato sustituyendo a cualquier otra garantía tácita expresa o implícita (salvo título), incluidas entre otras, las garantías de comerciabilidad e idoneidad para un fin, y cualesquiera otros términos y condiciones se excluyen de modo expreso por el presente en los límites permitidos por la ley. El cliente, en la medida autorizada por la ley, renuncia a toda garantía diferente a la acordada en estos términos.

Artículo 36. Servicio post-venta

La Dirección de Fabricación puede ofertar opcionalmente un servicio post-venta completo para los equipos instalados, incluyendo visitas de mantenimiento regulares/periódicas.

En circunstancias normales, la Dirección de Fabricación puede proveer de un tiempo de respuesta “in situ” de 48 - 60 horas. También puede proporcionar un servicio especial de respuesta “in situ” de 24 horas si se requiere.

Se incluirá como parte de la documentación final del equipo un listado de recambios recomendados, el cual consideramos muy recomendable para el cliente.

La Dirección de Fabricación puede también ofertar un contrato de mantenimiento periódico de la instalación incluyendo repetición de pruebas y re-cualificación para asegurar una óptima operación de la instalación.

Artículo 37. Regulación de doble uso

El adjudicatario del presente documento se compromete a cumplir con la Reglamentación por el que se establece un régimen comunitario de control de las exportaciones de productos y tecnologías de doble uso y/o cualquier otra Regulación que le sea de aplicación en relación con esta materia y se compromete a no re-exportar ningún producto entregado bajo el presente contrato sin la autorización de las autoridades competentes y sin obtener las licencias pertinentes de exportación de las mismas autoridades si fuera necesario.

La Dirección Técnica no será responsable, en ningún caso, del incumplimiento por parte del Comprador de las obligaciones mencionadas.

En el supuesto de que las autoridades competentes no permitan, o de cualquier modo impidan, a la Dirección Técnica la entrega de los productos ofertados en el presente documento, la Dirección de Fabricación se exime de cualquier responsabilidad por dicho incumplimiento ante el cliente.

Artículo 38. Seguridad

En la medida razonable, la Dirección Técnica garantiza que su equipo ha sido diseñado y fabricado de modo que es seguro y que no presenta riesgo para la salud, siempre que se instale y utilice de modo adecuado de acuerdo con las instrucciones de funcionamiento indicadas para el equipo por la Dirección Técnica. El cliente es responsable de cualquier riesgo para la salud o la seguridad del equipo que se encuentra en su posesión o bajo su control y debe asegurarse de que las personas que utilizan, realizan el mantenimiento o manipulan de otro modo el equipo reciban la formación adecuada y conozcan las medidas de seguridad. Si aplica, la Dirección Técnica suministrará los certificados de los elementos de seguridad del equipo y certificado de cumplimiento de si se aplica. El manual de instrucciones incluye las instrucciones pertinentes de seguridad.

Artículo 39. Seguros y responsabilidad

La Dirección Técnica afirma contar con los seguros suficientes de responsabilidad civil derivada de productos defectuosos.

La responsabilidad de la Dirección Técnica se limita a indemnizar al cliente por los costos y los daños directos y reales, efectivamente realizados y justificados en la medida que hayan sido causados por un acto u omisión por parte de la Dirección Técnica en relación con el equipo y hasta un total de 5% del precio del equipo. La responsabilidad de la Dirección Técnica cesará al expirar el período de garantía. La responsabilidad de la Dirección Técnica en ningún caso se extenderá a daños indirectos o incidentales, incluyendo pero sin limitarse a la pérdida de oportunidades, lucro cesante, de uso, ingresos o beneficios o capacidad de producción. El cliente acepta esta limitación.

Artículo 40. Fuerza mayor

Sin perjuicio de los términos del presente, El proyectista no será responsable del incumplimiento de sus obligaciones que surgen del presente contrato si la realización de cualquier obligación se ve dificultada o resulta imposible debido a circunstancias que no se encuentran razonablemente bajo el control de la Dirección de Producción o, sin perjuicio de lo anterior, en caso de huelga, cierre patronal, conflicto laboral o fallo de la planta, de suministros, del transporte o del equipo. Si debe retrasarse la entrega del equipo o la realización del cualquier trabajo durante más de seis meses, el cliente tendrá el derecho de cancelar el contrato o los elementos que faltan del mismo con el pago de una suma razonable por la parte realizada, pero no tendrá derecho a indemnización por daños o de otro tipo. La fecha límite para la entrega se extenderá por un periodo de tiempo equivalente a la duración del incidente.

Artículo 41. Cancelación

El cliente no puede cancelar el contrato o parte de éste salvo mediante acuerdo por escrito por la Dirección Facultativa. En caso de cancelación, se cobrará al cliente todo el trabajo realizado y los materiales proporcionados hasta el momento de la cancelación junto con un cargo por los gastos indirectos y las pérdidas de beneficios.

Artículo 42. Terminación

Si el cliente se declara en quiebra o, siendo una compañía, tiene un liquidador nombrado o una orden administrativa en contra, va a proceder a su

liquidación (salvo que se produzca para fines de reconstrucción o fusión) o incumple cualquier disposición del presente contrato, todos los importes del presente se vuelven inmediatamente debidos y pagaderos y la Dirección Facultativa puede, a pesar de cualquier renuncia anterior, rescindir el presente contrato de inmediato mediante notificación escrita, pero sin perjuicio de cualquier derecho anterior de cada parte.

Artículo 43. Ley aplicable

Las leyes de España rigen el presente contrato, la orden de compra y las presentes condiciones.

Artículo 44. Arbitraje

Las partes someten cualquier disputa que pueda surgir por la ejecución o la interpretación del presente contrato al tribunal arbitral de Valladolid. El nombramiento de un solo árbitro, así como el procedimiento de arbitraje, será realizado de conformidad con las normas del tribunal arbitral de Valladolid. El arbitraje se realizará en castellano/español.

Artículo 45. Nulidad

Si cualquier disposición del presente documento es declarada nula, inválida o ilegal por cualquier motivo, dicha nulidad, invalidez o ilegalidad no afectará a los demás términos y disposiciones, que permanecerán en vigor. Las partes de buena fe, negociarán una cláusula para sustituir aquella disposición declarada no conforme, que debe ser lo más respetuoso posible con la intención original de las partes.

Artículo 46. Renuncia

El no ejercicio, o cualquier retraso en el ejercicio, por parte del cliente de cualquier derecho o solución en virtud de los términos del presente documento se considerará renuncia del mismo. El no ejercicio de un derecho no impedirá que pueda ejercerse en el futuro éste u otro derecho que se otorga en el presente documento, en cualquier otro documento relacionado o en la ley.

Artículo 47. Efecto vinculante, asignación

Ninguna de las partes puede transferir, asignar o subrogar, total o parcialmente, los derechos y obligaciones del presente documento sin el consentimiento previo y por escrito de la otra, sino que será vinculante y garantizará el beneficio apropiado y será exigible por las partes que firmaron el presente documento y por cualquier sucesor, asignados permitidos o representante legal.

Artículo 48. Personal del proveedor

La Dirección de Fabricación garantiza que la relación laboral de todo su personal que intervenga en la ejecución del presente proyecto cumple todo lo establecido en la Legislación Española vigente, incluido la situación relativa a cotización a la Seguridad Social y legislación específica sobre prevención de riesgos laborales, comprometiéndose a acreditarlo documentalmente al cliente mediante los impresos oficiales correspondientes.

La Dirección de Fabricación declara expresamente conocer y aceptar las Normas de Seguridad y Salud específicas, y se compromete y responsabiliza de su total cumplimiento también por parte de su personal, sin perjuicio de la obligación de la Dirección Técnica de preparar y entregar al cliente un plan de seguridad y salud específico para la realización de las prestaciones objeto del presente Acuerdo en los casos en que proceda. Serán de cargo de la Dirección de Fabricación cuantos gastos y costes sean necesarios para garantizar el estricto cumplimiento por el personal de la normativa relacionada con la prevención de riesgos laborales.

Artículo 49. Limpieza de obras y medio ambiente

La Dirección Técnica será responsable de mantener las condiciones adecuadas de limpieza en las instalaciones del cliente en que deban realizarse las prestaciones contratadas, debiendo pues realizar a su costa todo lo necesario para impedir la acumulación de desperdicios o basuras, incluyendo la limpieza semanal o en cualquier momento a solicitud del cliente. Asimismo, la Dirección de Fabricación se compromete a cumplir la normativa aplicable si la hubiere y se abstendrá de verter cualquier residuo sólido o líquido en las instalaciones del cliente, ni utilizará, salvo de acuerdo con el cliente, áreas no pavimentadas o protegidas del subsuelo, como almacén de materiales que puedan afectar al mismo. A la terminación del trabajo el personal de fabricación retirará toda la basura y desperdicios, así como todas las herramientas, andamios y materiales sobrantes, y procederá a una limpieza general de toda la zona.

Artículo 50. Confidencialidad

Durante la vigencia de la implementación del presente documento y cinco (5) años posteriores a su finalización o terminación por cualquier causa, ambas partes mantendrán estrictamente confidencial la existencia y contenido del presente documento, así como cualquier información de o sobre ellas a la que de cualquier forma puedan tener acceso con motivo de la ejecución de las prestaciones documentadas. Asimismo, la Dirección Facultativa renuncia a la colocación de cualquier tipo de publicidad en el

sistema implementado en la máquina, así como en los recintos de trabajo durante la duración de la fabricación, sin previa autorización del cliente.

Artículo 51. Terminación

Cualquiera de las partes podrá rescindir el presente Acuerdo en caso de incumplimiento de la otra parte de sus obligaciones derivadas del mismo, mediante notificación escrita con efectos inmediatos, si el incumplimiento no es subsanado en el plazo máximo de treinta (30) días desde el oportuno requerimiento también por escrito. La empresa dispondrá asimismo de dicho derecho de terminación anticipada en supuestos de insolvencia o situaciones concursales que afecten al PROVEEDOR.

Artículo 52. Cesión

El cliente no podrá ceder ni transferir el presente documento, ni subcontratar las prestaciones objeto del mismo, total o parcialmente, sin el consentimiento previo, expreso y escrito de la Dirección Facultativa, la cual se reserva dichas facultades de cesión y transferencia del Acuerdo a terceros libremente y sin limitación.

Artículo 53. Otras disposiciones

Cualquier modificación de los pactos y condiciones establecidos en el presente Acuerdo y sus Anexos, deberá ser realizada por escrito y debidamente firmada por ambas partes. El presente documento anula cualquier acuerdo anterior firmado entre las partes relativo al objeto del presente Acuerdo. La relación entre el proyectista y cliente que se establece en el presente Acuerdo será la de un contratante independiente, y en ningún caso, nada de lo contenido en el mismo o lo realizado durante su ejecución será interpretado, en ningún sentido, como que el proyectista se constituye en empleado, socio, representante, agente o mandatario del cliente. Ambas partes acuerdan expresamente que cualquier renuncia expresa o tácita por cualquiera de las partes a cualquiera de los derechos que el presente Acuerdo les otorga, en ningún caso significará renuncia a cualquier otro derecho de los que a cada parte se reconocen en el mismo. La invalidez jurídica de cualquiera de las cláusulas y pactos del presente Acuerdo en ningún caso implicará la terminación del mismo, acordándose por ambas partes y de forma expresa para tal supuesto el mantenimiento de su contenido restante en la medida en que por su naturaleza ello sea posible. El presente Acuerdo podrá ser elevado a público ante Notario por cualquiera de las partes en cualquier momento, corriendo los gastos por ello ocasionados a cargo de quien lo instare.

Artículo 54. Recepciones provisionales

Para proceder a la recepción provisional del equipo será necesaria la presencia del cliente, de la Dirección de la Fabricación y de la Dirección Técnica o su representante debidamente autorizado.

Si el equipo se encuentra en buen estado y ha sido ejecutado con arreglo las condiciones establecidas se darán por percibidas provisionalmente, comenzando a correr en dicha fecha el plazo de garantía que se considerará de tres meses.

Cuando el equipo no se halle en estado de ser recibido se hará constar en el acta y se especificaran en la misma las precisas y detalladas instrucciones que la Dirección Técnica debe señalar a la Dirección de Fabricación para remediar los defectos observados, fijándose un plazo para subsanarlos, expirado el cual se efectuará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones, a fin de proceder a la recepción provisional del equipo.

Después de realizar un escrupulosa reconocimiento y si el equipo estuviese conforme con las condiciones de este Pliego, se levantará un acta por duplicado, a la que acompañaran los documentos justificantes de la liquidación final. Una de las actas quedará en poder de la propiedad y la otra se entregará al contratista.

Artículo 55. Recepción definitiva

Terminado el plazo de garantía, se verificará la recepción definitiva con las mismas condiciones que la provisional, y si el equipo está bien conservado y en perfectas condiciones el Contratista quedará relegado de toda responsabilidad económica; en el caso contrario se retrasara la recepción definitiva hasta que, a juicio de la Dirección de Fabricación, y dentro del plazo que se marque, queden las obras del modo y forma que se determinan en este Pliego.

Si el nuevo reconocimiento resultase que el Contratista no hubiese cumplido, se declarará rescindida la contrata con pérdida de la fianza, a no ser que la propiedad crea conveniente conceder un nuevo plazo.

Artículo 56. Liquidación final

Terminado el equipo, se procederá a la liquidación, que incluirá el importe de las unidades de máquina realizadas y las que constituyen

modificaciones del proyecto, siempre y cuando hayan sido previamente aprobadas por la Dirección Técnica con sus precios.

De ninguna manera tendrá derecho el Contratista a formular reclamaciones por aumentos de obra que no estuviesen autorizadas por escrito a la propiedad con el visto bueno de la Dirección de Fabricación.

Artículo 57. Liquidación en caso de rescisión

En este caso, la liquidación se hará mediante un contrato liquidatorio, que se redactará de acuerdo por ambas partes, incluirá el importe de las unidades de obra realizadas hasta la fecha de la rescisión.

Epígrafe V: FACULTADES DE LA DIRECCIÓN DE OBRAS

Artículo 58. Facultades de la Dirección de Fabricación

Además de todas las facultades particulares, que corresponde al Director, expresadas en los artículos precedentes, es misión específica suya la Dirección de Fabricación y vigilancia de los trabajos que en las obras se realicen bien por sí o por medio de sus representantes técnicos y ello con autoridad técnica legal, completa e indiscutible, incluso en todo lo no previsto específicamente en el “Pliego General de Condiciones Varias de la Producción”, sobre los trabajadores y herramientas situadas en la máquina y en relación con los trabajos que para la adaptación de los edificios y obra anejas se lleven acabo, pudiendo incluso, pero con causa justificada, recusar al Contratista, si considera que el adoptar esta resolución es útil y necesaria para la debida marcha de la obra.

CAPITULO IV: PLIEGO DE CONDICIONES ECONÓMICAS

Epígrafe I: BASE FUNDAMENTAL

Artículo 59. Base fundamental

Como base fundamental de estas “Condiciones Generales de Índole Económicas”, se establece el principio de que el Contratista debe percibir el importe de todos los trabajos ejecutados, siempre que estos se hayan realizado con arreglo y sujeción y Condiciones Generales particulares que rigen la fabricación y adaptación contratada.

Epígrafe II: GARANTÍAS DE CUMPLIMIENTO Y FIANZAS

Artículo 60. Garantías

La Dirección de Fabricación podrá exigir al Contratista la presencia de referencias bancarias o de otras entidades o persona, al objeto de cerciorarse de si éste reúne todas las condiciones requeridas para el exacto cumplimiento del Contrato; dichas referencias, si le son pedidas, las presentará el Contratista antes de la firma del Contrato.

Artículo 61. Fianzas

Se podrá exigir al Contratista, para que responda del cumplimiento de lo contratado, una fianza del 10% del presupuesto de las tareas adjudicadas.

Artículo 62. Devolución de la fianza

La fianza depositada será devuelta al Contratista en un plazo que no excederá de 8 días, una vez firmado el acta de recepción definitiva del equipo, siempre que el Contratista haya acreditado, por medio de certificado de la Dirección de Fabricación, que no existe reclamación alguna contra él por los daños y perjuicios que sean de su cuenta o por deudas de los jornales o materiales, ni por indemnizaciones derivadas de accidentes ocurridos en el trabajo.

Epígrafe III: PRECIOS Y REVISIONES

Artículo 63. Precios contradictorios

Si ocurriese algún caso por virtud del cual fuese necesario fijar un nuevo precio, se procederá a estudiarlo y convenirlo contradictoriamente de la siguiente forma:

El Adjudicatario formulará por escrito bajo su firma, el precio que, a su juicio, debe aplicarse a la nueva unidad.

La Dirección Técnica estudiará el que, según su criterio, deba utilizarse.

Si ambos son coincidentes se formulará por la Dirección Técnica el Acta de Avenencia, igual que si cualquier pequeña diferencia o error fuese salvado por simple exposición y convicción de una de las partes, quedando así formalizado el precio contradictorio.

Si no fuera posible conciliar por simple discusión los resultados, el Sr. Director propondrá a la propiedad que adopte la resolución que estime conveniente, que podrá ser aprobatoria del precio exigido por el Adjudicatario o, en otro caso, la segregación de la instalación nueva para ser ejecutada por administración o por otro adjudicatario distinto.

La fijación del precio contradictorio habrá de preceder necesariamente al comienzo de la nueva unidad, pues que, si por cualquier motivo ya se hubiese comenzado el Adjudicatario estará obligado a aceptar el que buenamente quiera fijarle el Sr. Director y a concluir la satisfacción de este.

Artículo 64. Reclamaciones de aumento de precios

Si el Contratista antes de la firma del Contrato, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error y omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirve de base para la ejecución de los trabajos.

Tampoco se le admitirá reclamación de ninguna especie fundada en indicaciones que, sobre las obras, se hagan en Memoria, por no servir este documento de base a la Contrata. Las equivocaciones materiales o errores aritméticos en las unidades de máquina o su importe, se corregirán en cualquier época que se observen, pero no se tendrán en cuenta a los efectos de la rescisión de contrato, señalados en los documentos relativos a las “Condiciones Generales o Particulares de Índole Facultativa, sino en el caso de que la Dirección de Obra o el Contratista los hubieran hecho notar dentro del plazo de 4 meses contados desde la fecha de adjudicación.

Las equivocaciones materiales no alterarán la baja proporcional hecha en la Contrata, respeto del importe del presupuesto que ha de servir de base a la misma, pues esta baja se fijará siempre por la relación entre las cifras de dicho presupuesto, antes de las correcciones y la cantidad ofrecida.

Artículo 65. Revisión de precios

Contratándose la fabricación a riesgo y ventura, es natural por ello, que no se debe admitir la revisión de los precios contratados. No obstante, y dada la variabilidad continua de los precios de los jornales y sus cargas sociales, así como la de los materiales y transportes, que es características de determinar épocas anormales, se admite durante ellas, la revisión de los precios contratados, bien en alza o baja y en anomalía con las oscilaciones de los precios en el mercado.

Por ello y en los casos de revisión en alza, el Contratista puede solicitarla del Propietario, en cuanto se produzca cualquier alteración de precio, que repercuta, aumentando los contratos.

Ambas partes convendrán el nuevo precio unitario antes de comenzar o de continuar la ejecución de la unidad de obra en que intervenga el elemento cuyo precio en el mercado, y por causa justificada, especificándose y acordándose también previamente, la fecha a partir de la cual se aplicará el precio revisado y elevado, para lo cual se tendrá en cuenta y cuando así procede, el proceda, el acopio de materiales de obra en el caso de que estuviesen total o parcialmente abonados por el propietario.

Cuando el propietario o la Dirección de Fabricación, en su representación, no estuviese conforme con los nuevos precios de los materiales, transportes, etc. Concertará entre las dos partes la baja a realizar en los precios unitarios vigentes en la obra, en equidad por la experimentada por cualquiera de los elementos constitutivos de la unidad de obra y la fecha en que empezarán a regir los precios revisados.

Cuando entre los documentos aprobados por ambas partes, figurase el relativo a los precios unitarios contratados descompuestos, se seguirá un procedimiento similar al preceptuado en los casos de revisión por alza de precios.

Artículo 66. Elementos comprendidos en el presupuesto

Al fijar los precios de las diferentes unidades de máquina en el presupuesto, se ha tenido en cuenta el importe de andamiajes, vallas, elevación y transporte del material, es decir, todos los correspondientes a medios auxiliares de la fabricación, así como toda suerte de indemnizaciones, impuestos, multas o pagos que tengan que hacerse por cualquier concepto, con los que se hallen gravados o se graben los materiales o las obras por el Estado, Provincia o Municipio.

Por esta razón no se abonará al Contratista cantidad alguna por dichos conceptos.

En el precio de cada unidad también van comprendidos unos materiales accesorios y operaciones necesarias para dejar el equipo completamente terminado y en disposición de recibirse.

Epígrafe IV. VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS

Artículo 67. Valoración de los trabajos

La medición de los trabajos concluidos se hará por el tipo de unidad fijada en el correspondiente presupuesto.

La valoración deberá obtenerse aplicando a las diversas unidades del equipo, el precio que tuviese asignado en el Presupuesto, añadiendo a este importe el de los tantos por ciento que correspondan al beneficiario industrial y descontando el tanto por cierto que corresponda a baja en la subasta hecha por el Contratista.

Artículo 68. Mediciones parciales y finales

Las mediciones parciales se verifican en presencia del Contratista, de cuyo acto se levantará acta por duplicado, que será firmada por ambas partes. La medición final se hará después de terminada la fabricación con precisa asistencia del Contratista.

En el acta que se extienda, de haberse verificado la medición de los documentos que se acompañan, deberá aparecer la conformidad del Contratista o de su representación legal. En caso de no haber conformidad, lo expondrá sumariamente y a reserva de ampliar las razones que a ello obliga.

Artículo 69. Equivocación en el presupuesto

Se supone que el Contratista ha hecho detenido estudio de los documentos que componen el Proyecto, y por tanto al no haber hecho ninguna observación sobre posibles errores o equivocaciones en el mismo, se entiende que no haya lugar a disposición alguna en cuanto afecta a medidas o precios de tal suerte, que la fabricación ejecutada con arreglo al Proyecto contiene mayor número de unidades de las previstas no tiene derecho a reclamación alguna. Si por el contrario, el número de unidades fuera inferior, se descontará del presupuesto.

Artículo 70. Valoración de obras incompletas

Cuando por consecuencia de rescisión u otras causas fuera preciso valorar las obras incompletas, se aplicarán los precios del presupuesto, sin que pueda pretenderse hacer la valoración de la unidad de obra fraccionándola en forma distinta a la establecida en los cuadros de descomposición de precios.

Artículo 71. Carácter provisional de las liquidaciones parciales

Las liquidaciones parciales tienen carácter de documentos provisionales a buena cuenta, sujetos certificaciones y variaciones que resulten de la liquidación final. No suponiendo tampoco dichas certificaciones aprobación y recepción de la fabricación que comprende. La propiedad se reserva en todo momento y especialmente al hacer efectivas las liquidaciones parciales, el derecho de comprobar que el Contratista ha cumplido los compromisos referentes al pago de jornales y materiales invertidos en el equipo, a cuyo efecto deberá presentar el Contratista los comprobantes que se exijan.

Artículo 72. Pagos

Los pagos se efectuarán por el cliente en los plazos previamente establecidos y su importe corresponderá, precisamente, al de las Certificaciones de equipo expedidas por la Dirección de Fabricación, en virtud de la cuales se verifican aquellos.

Artículo 73. Suspensión por retrasos de pagos

En ningún caso podrá el Contratista, alegando retraso en los pagos, suspender trabajos ni ejecutarlos a menos ritmo del que les corresponda, con arreglo al plazo en que deben terminarse.

Artículo 74. Indemnización por retraso de los trabajos

El importe de la indemnización que debe abonar el Contratista por causas de retraso no justificado, en el plazo de terminación de los trabajos contratados, será: el importe de la suma de perjuicios materiales causados por imposibilidad de ocupación del inmueble, debidamente justificados.

Artículo 75. Indemnización por daños de causa mayor al contratista

El Contratista no tendrá derecho a indemnización por causas de pérdidas, averías o perjuicio ocasionados durante la fabricación, sino en los casos de fuerza mayor. Para los efectos de este artículo, se considerarán como tales casos únicamente los que siguen:

- Los incendios causados por electricidad atmosférica.
- Los daños producidos por terremotos y maremotos.
- Los producidos por vientos huracanados, mareas y crecidas de ríos superiores a las que sean de prever en el país, y siempre que exista constancia inequívoca de que el Contratista tomó las medidas posibles,



dentro de sus medios, para evitar o atenuar los daños.

- Los que provengan de movimientos del terreno en que estén construidas las obras.

- Los destrozos ocasionados violentamente, a mano armada, en tiempo de guerra, movimientos sediciosos populares o robos tumultuosos.

La indemnización se referirá, exclusivamente al abono de las unidades de máquina ya ejecutadas o materiales acopiados a pie de obra, en ningún caso comprenderá medios auxiliares, maquinaria o instalaciones, etc., propiedad de la Contrata.

Epígrafe V. VARIOS

Artículo 76. Mejoras de obras

No se admitirán mejoras de equipo, más que en el caso en que la Dirección de Fabricación haya ordenado por escrito la ejecución de los trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados, así como la de los materiales y aparatos previstos en el Contrato. Tampoco se admitirá aumentos de trabajos en las unidades contratadas, salvo caso de error en las mediciones del Proyecto, a menos que la Dirección de Fabricación ordene, también por escrito, la ampliación de las contratadas.



CAPÍTULO V

SEGURIDAD



ÍNDICE

1. Almacenamiento de materias primas y productos finales....	325
1.1. Riesgos derivados	325
1.2. Medidas preventivas generales	327
1.3. Apilamientos	328
1.3.1. Apilamiento de papel recuperado.....	330
1.3.2. Apilamiento de pasta de papel	333
1.3.3. Apilamiento de bobinas	337
2. Equipos y máquinas	344
2.1. Formación del operario	345
2.2. Mantenimiento y reparación.....	346
2.3. Instrucciones comunes a la utilización de todas las máquinas.....	347
2.4. Palas cargadoras.....	350
2.5. Carretillas elevadoras	354
2.6. Grúas Móviles	360
2.7. Cuartos de carga de baterías	367
3. Zona de pulpeado	371
4. Plan de emergencias	377
4.1. Definiciones	377
4.2. Generalidades	379
4.2.1. Consideraciones para la planificación.....	379
4.2.2. Consideraciones para la organización.....	381
4.2.3. Consideraciones para la ejecución	381
4.2.4. Consideraciones para la evaluación.....	381



En el aspecto de seguridad, debe ser entendida la fábrica en su conjunto, no solamente se ven afectados los operarios que trabajen cercanos al púlper, ya que se produce un tráfico de trabajadores y materias primas constante, por ello la seguridad debe ser entendida desde un aspecto global de la fábrica.

Las actividades de la industria papelera conllevan un importante movimiento de materiales característicos de la misma tales como, madera, pasta, papel recuperado, producto terminado en bobinas etc. que precisan de la utilización de diversos equipos de trabajo como carretillas, transpaletas o palas cargadoras con los que se realizan operaciones de carga y descarga, transporte, almacenamiento y apilado de estos materiales.

1. Almacenamiento de materias primas y productos finales

1.1. Riesgos derivados

Los almacenamientos presentan una serie de riesgos que, con independencia de las condiciones de almacenamiento, siempre debemos tener en consideración.

Así, en el transcurso de los trabajos derivados de las operaciones que se realizan en estas instalaciones, el personal del almacén puede estar sometido a los siguientes riesgos:

- **Caída de cargas**

La caída de cargas sobre zonas de paso o de trabajo pueden estar producidas por:

- La utilización de elementos de carga sin la resistencia adecuada.
- La deficiente colocación de las cargas. Este problema se acentúa si el equipo de mantenimiento se conduce de forma inadecuada, el piso está en mal estado (baches, grietas, derrames de sustancias, etc.) o existen pendientes, desniveles o bordillos acentuados.
- Apilamientos verticales a excesiva altura.
- Dispositivos de retención de cargas defectuosos o inexistentes (redes, mallas, flejes, largueros tope, etc.).
- La mala apreciación de la altura de colocación de la carga por parte del conductor del equipo de mantenimiento.



- **Hundimiento de los niveles de carga**

El hundimiento de las cargas puede estar producido por:

- La sobrecarga local o general que genera la deformación de los elementos de la estructura.
- Sobrepasar los límites máximos de carga admisibles por desconocimiento del peso real de las unidades de carga manipuladas.
- Golpes o choques de las carretillas de elevación o de su carga contra los elementos de la estructura, que provocan deformaciones y perjudican la estabilidad del conjunto.

- **Golpes y atropellos de vehículos**

Los golpes y atropellos causados por los vehículos y equipos de almacenamiento, pueden estar producidos por:

- La inexistencia de ordenación de las zonas del almacén, lo que provoca el atropello de personas por las carretillas que circulan por los pasillos o por la realización de trabajos de confección o división de las cargas, preparación de pedidos, etc., en zonas de circulación.
- La falta de formación adecuada del personal en el manejo de los equipos de mantenimiento y/o en el uso de las estanterías.

- **Choques entre vehículos**

Los choques entre vehículos pueden estar producidos por:

- Carencia de señalización.
- Insuficiente iluminación en los pasillos de circulación y cruces.
- Insuficiente dimensionado de los pasillos para el cruce de carretillas.

- **Golpes entre vehículos y estructuras de almacenamiento o contra grupos de apilamiento**

Los golpes entre vehículos y estructuras de almacenamiento o contra grupos de apilamiento, tienen su especial causa en el insuficiente dimensionado de los pasillos, demasiado estrechos para las características técnicas de las carretillas (anchura, radio de giro, tipo de carga, etc.).



1.2. Medidas preventivas generales

Los trabajos en las instalaciones de almacenamiento requieren la adopción de medidas preventivas con objeto de controlar los riesgos en las operaciones de apilado y desapilado, la identificación de las prestaciones de la instalación y la identificación de cualquier modificación, tanto en las zonas como en las estructuras de almacenamiento, relativo a las condiciones de uso explotación, señalización, mantenimiento, iluminación y limpieza.

Con este objeto y como complemento a lo descrito en el apartado anterior, a continuación se recogen de forma no exhaustiva, las siguientes:

- Todas las cargas han de ser manipuladas con la maquinaria adecuada y sus accesorios (tipo y medidas de horquilla, capacidad de carga, elevación de los mástiles, etc.).
- Cuando el tamaño, forma o resistencia de los objetos no permitan obtener cargas de cohesión suficiente como para oponerse a su caída, éstas serán inmovilizadas con la ayuda de dispositivos de retención de resistencia garantizada (fundas de material plástico retráctil, redes, cintas, flejes, etc.) y se apilarán en el suelo.
- El almacén estará dotado, siempre que sea posible, de área(s) específica(s), debidamente señalizada(s), para la preparación de los pedidos y el acondicionamiento de las cargas. No obstante, en el caso en que se deban realizar trabajos de confección y separación de cargas (picking) en los pasillos, antes de comenzar los trabajos se señalará adecuadamente la zona y sus accesos para evitar que se produzcan accidentes.
- Cualquier cambio en la localización de las zonas de almacenamiento, debe comportar obligatoriamente un nuevo cálculo del diseño de la distribución de cargas y la aprobación de las nuevas condiciones dentro de la organización de la gestión del almacén, así como su señalización y medidas complementarias, con objeto de evitar confusiones.
- Deben mantenerse libres de todo obstáculo los pasillos de servicio y circulación de las carretillas, así como los pasillos peatonales.
- Los pasillos de servicio tendrán una anchura suficiente para permitir el tránsito seguro de las carretillas y de sus maniobras.
- Los pasillos peatonales ubicados en las vías de circulación de carretillas tendrán un ancho mínimo de 1 m y estarán debidamente señalizados. Es aconsejable, cuando sea posible, dotar de banderas separadoras a los pasillos peatonales.
- Se prohibirá el paso de personas por los pasillos de servicio, y si excepcionalmente se hace, se señalará la prohibición de acceso para



- vehículos de manutención. Se prohíbe el acceso a las áreas de almacenamiento de personal foráneo.
- Deben extremarse las precauciones en los entrecruzamientos de los pasillos, mediante señalización y medios que faciliten la visibilidad, por ej. espejos adecuados.
 - No se circulará, bajo ningún concepto, con la carga elevada.
 - Se señalarán las zonas de almacenamiento y los pasillos, tanto de servicio como peatonales.
 - No se realizarán almacenamientos, aunque sea transitoriamente, en los pasillos de circulación, obstruyendo salidas de emergencia o los medios de extinción de incendios.

1.3. Apilamientos

El método de apilamiento presenta la ventaja de no necesitar de elementos auxiliares, como estanterías, para realizar el almacenamiento, permitiendo un mayor aprovechamiento de la superficie. Por el contrario, para realizar este tipo de almacenamiento se necesita maquinaria auxiliar, a la vez que se puede presentar el riesgo de accidente por caída en altura del material, tanto durante la estiba como la desestiba del mismo.

Entre las condiciones a considerar para evitar la caída de los materiales almacenados podemos indicar:

- Superficies, suelos y soleras, con pendientes o irregulares.
- Sobrecarga de la pila.
- Falta de verticalidad de la pila.
- Tiempo de almacenamiento.
- Características de los elementos a apilar como:
 - Dimensiones.
 - Deterioro, por ejemplo de los alambres y flejes y/o humedad.
 - Falta de resistencia.
 - Utilización de palets.

Por ello, cuando se requiere la realización de un apilamiento debemos de considerar diferentes factores como:

- Lugar de apilamiento.
- Distribución de las pilas:
 - En bloque
 - Adosado
 - En isla

Estas pilas pueden a su vez estar apoyadas en muros o paredes, adoptándose en algunos casos una estructura de escalera.

- **Altura máxima del apilado**

De todos estos parámetros el que resulta crítico es el que se refiere a la altura máxima de apilado. Para ello, no existen criterios estandarizados sobre la altura máxima de apilamiento salvo el referente a limitación de los propios elementos de apilado, carretillas elevadoras y grúas, siendo por tanto una limitación de tipo funcional y no de seguridad

Así mismo, debemos tener en cuenta que la altura máxima puede venir condicionada, en aquellos casos donde se disponga de exutorios para evacuación de humos y gases de combustión en caso de incendio, por la necesidad de dejar una capa libre para la evacuación de humos. Esta capa será de al menos 0,5 m por encima de la carga.

Aunque más adelante nos referiremos a las condiciones de apilamiento específicas de cada para nuestro material, como criterios generales de estabilidad podemos decir que, para el apilamiento de bultos, paletizados o no, y en buenas condiciones de estabilidad y resistencia, hasta tres alturas se consideran seguros. A partir de tres alturas y hasta cinco, la estabilidad podría estar comprometida por lo que debe ser analizada en función de cada situación concreta, a partir de seis alturas la estabilidad no puede considerarse garantizada.

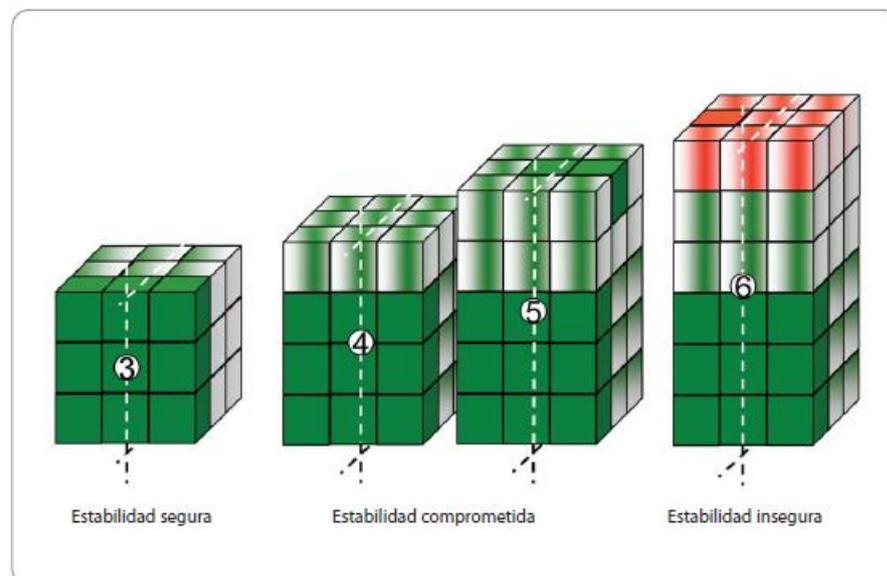


Figura V.1.1: Estabilidad del apilado

No obstante, por estabilidad de los apilamientos, se recomienda que la altura de los apilamientos no sobrepase los 5 metros.

1.3.1. Apilamiento de papel recuperado

El papel recuperado habitualmente se recibe en las fábricas en forma de balas comprimidas y recogidas mediante alambres papeleros.

Se debe disponer de procedimientos para comprobar, medir (si es posible) y evaluar los parámetros críticos en el momento de la recepción en la fábrica. Entre estos parámetros, para garantizar un adecuado almacenamiento se deben comprobar al menos las condiciones de la bala, condición de los alambres y calidad de la compresión de la bala, así como el contenido de humedad.

En el caso de que alguna bala llegue deteriorada, con alambres rotos o sin la adecuada compresión, debe ser almacenada sin apilar, de manera que no se comprometa la estabilidad del apilamiento.

Habitualmente las balas tendrán un peso mínimo de 400 Kg, estableciendo para las balas dos rangos:

- Balas Medianas (BM): de 400 Kg. a 800 Kg.
- Balas Grandes (BG): de 700 Kg. en adelante.
-

Durante las operaciones de descarga se ha de tener precaución de no deteriorar los alambres de las balas con las pinzas de las carretillas o por arrastre durante el transporte.

El papel recuperado presentado en balas o fardos fijados por flejes, se almacenará preferentemente en la modalidad de "apilado en bloque" o de "apilado adosado". Las labores de apilado se realizarán con palas cargadoras o en su caso con carretillas elevadoras, siendo las características de estos equipos los que nos determinarán el número de fardos y peso de la carga a descargar y apilar de cada vez. En algunos casos, los apilamientos de fardos de papel recuperado son humedecidos periódicamente para disminuir el riesgo de incendios. Cuando se realice esta operación se deberá tener en cuenta que la estabilidad del apilamiento podría verse comprometida, debido al aumento de volumen como consecuencia de la absorción de agua por el fardo.

Las operaciones de apilado, se llevarán a cabo de acuerdo a las siguientes las indicaciones:



- **Modo de almacenamiento**

Limitación de la altura y del peso de las pilas

Como criterio general no se apilará a más de cinco niveles o 5,5 metros de altura, cuando las balas sean grandes, 1 metro de alto, y cuatro alturas cuando las balas sean de un tamaño inferior a 1 metro. Siempre se comprobará la seguridad del apilado teniendo especial cuidado en los extremos de la pila y las zonas de paso.

En caso de pilas de menos de 5 fardos de ancho se rebajará la altura 2-3 niveles, si se estima que la estabilidad del conjunto puede verse comprometida. Los apilamientos de balas en zona no techada, deben respetar un tamaño máximo de pila de 750 Tm.

Colocación de las pilas y limitación de tamaño

El tamaño y dimensiones de las pilas deberá estar señalado y delimitado en el propio almacén y se limitarán las zonas de almacenamiento. El tamaño de las pilas será como mínimo de 2 filas de fardos, cuando se trabaje en los valores de altura ordinarios de 5 niveles (en todo caso se sopesará la estabilidad de la pila, y se rebajará la altura si se estima necesario).

El apilado en altura de los fardos se realizará manteniendo la verticalidad. Se recomienda colocar el fardo superior de la pila ligeramente montado entre dos columnas, para dar mayor estabilidad al conjunto.

La colocación por columnas se realizará de tal modo, que se dispongan los fardos paralelos a los pasillos entre pilas. La cara menor del fardo se expondrá a la zona de maniobra (zona de acceso para apilado) de la máquina de servicio.

No se deben apilar balas de distinto tamaño en una misma hilera, las balas con tamaños fuera de los habituales serán acopiadas en una zona diferenciada de la pila. Es conveniente realizar el desapilado de los fardos en orden inverso al que se realizó el apilado, desde la parte superior a la inferior comenzando por un extremo.

La manipulación de los fardos se realizará de acuerdo con las capacidades de la maquinaria y características de los fardos, con el límite de dos fardos simultáneamente. En este caso las pinzas siempre deberán abarcar ambos fardos, no debiendo cargar dos fardos cuando uno de ellos quede suelto sin sujeción y por tanto con riesgo de caída durante la descarga. La manipulación se realizará de manera que no



se comprometa la visibilidad y estabilidad de la carga durante las tareas de apilado y desapilado.

En el caso de que los fardos tuviesen una altura inferior a 1 m, se deberá realizar un análisis de la estabilidad del apilamiento reduciendo los niveles hasta que la estabilidad del apilamiento quede asegurada.

- **Organización de las zonas de almacenamiento**

En la organización de las zonas de almacenamiento deberán tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

Anchuras de calles entre pilas y zonas de circulación de vehículos

Las pilas se formarán en las zonas de almacenamiento delimitadas para tal efecto, por las líneas marcadas y señalizadas, no debiendo constituir apilamientos en los pasillos destinados a circulación de vehículos. Se dispondrán pasillos principales, destinados a la circulación de camiones, con una anchura mínima recomendada de 8 metros.

Se dispondrán pasillos secundarios, destinados a la circulación de máquinas de carga y descarga, con una anchura mínima de 4,5 metros.

En la zona de descarga de camiones, queda definida una anchura mínima de 16 metros, que asegura un área suficiente para las maniobras, tanto de las máquinas de carga y descarga, como de los camiones.

Limitación de las zonas peatonales

Se determinarán y señalizarán los pasillos peatonales para acceder al patio de almacenamiento. Debe prohibirse el tránsito de peatones por los pasillos de las máquinas de servicio, habilitados entre pilas de fardos, durante operaciones de apilado y desapilado.

De acuerdo con el *RD 485/97 de disposiciones mínimas de señalización*, cuando sea necesario, para garantizar la seguridad de los trabajadores, las zonas de circulación de vehículos de delimitaran con claridad mediante franjas continuas de color bien visible, preferentemente blanco o amarillo, teniendo en cuenta el color del suelo.



Cuando personal ajeno al almacén deba acceder a las zonas de apilado, se deberá contar con autorización expresa del responsable de la instalación. Los trabajos que se realicen en estas zonas por personal externo estarán debidamente señalizados.

Mantenimiento de la distancia mínima de pilas a edificios e instalaciones

Las pilas de fardos deben guardar unas distancias adecuadas con respecto a determinados equipos y/o instalaciones, con objeto de preservar su acceso y/o evitar riesgos de daños en caso de derrumbe, u otra incidencia. Se recomienda una distancia libre de al menos 10 m desde los apilamientos hasta las subestaciones de energía eléctrica.

- **Otras indicaciones**

La Velocidad de circulación máxima, en carga, en tareas de apilado y desapilado debe limitarse a 10 Km/h.

La Circulación con la máquina de servicio cargada, se realizará en todo momento marcha atrás hasta llegar a la zona de apilado o descarga, siempre que la visibilidad se vea comprometida por la carga transportada.

No se permitirá la recogida directa de alambres mediante arrastre con la carretilla o pala cargadora.

Antes y durante las tareas de apilado y desapilado, el carretillero comprobará visualmente la inexistencia de personas cercanas al área de trabajo.

Si se detectasen apilamientos en mal estado o inestables, se procederá inmediatamente a su correcto reapilado. Si los fardos están seriamente dañados y no es seguro su apilado, se retirarán.

Se recomienda realizar inspecciones periódicas de las condiciones de apilado, con una periodicidad, al menos quincenal.

1.3.2. Apilamiento de pasta de papel

La pasta de papel constituye un producto terminado para la mayoría de las fábricas de pasta, salvo en aquellas que tienen integrado el

proceso de producción de papel en cuyo caso se trata de una materia prima intermedia del proceso.

En la pasta de papel, siempre debemos considerar la humedad del producto ya que no es un parámetro uniforme y generalmente está condicionada por el transporte. Por otra parte, para su envío a los centros de transformación se puede expedir de dos maneras, que condicionan su almacenamiento, según el origen.

En forma de fardos o bultos formados por 4 u 8 balas de pasta cada uno, sujetos mediante flejes metálicos y que pueden venir paletizados o no, o en forma de balas de láminas de pasta flejadas sobre palet.



Figura V.1.2: Apilamiento en forma de fardos

Su almacenamiento se realiza en las zonas destinadas al efecto, en apilamientos en bloque o adosados.

1.3.2.1. *Apilamiento de fardos*

Dada la variedad de empaquetamientos y características de las pastas no es posible establecer criterios generales de apilamientos, por lo que en cada caso particular se deberá analizar las condiciones de apilamiento más seguras. No obstante, para el apilamiento de fardos de pasta de papel se tendrán en cuenta las recomendaciones para papel recuperado vistas en el punto anterior.



Este tipo de fardos podrá ser apilado en forma de bloques o adosados.

- **Modo de almacenamiento**

Limitación de la altura y del peso de las pilas

En el almacenamiento tipo adosado, la colocación de las columnas se realizará de tal modo que se dispongan los fardos paralelos a los pasillos entre pilas. La cara menor del fardo se expondrá a la zona de maniobra (zona de acceso para apilado) de la carretilla elevadora.

La altura máxima de la pila será de 3 niveles o 5,5 metros de altura con cinco fardos en la base. En caso de pilas de menos de 5 fardos de ancho, se rebajará la altura 2 niveles, si se estima que la estabilidad del conjunto se puede ver comprometida.

Las pilas tendrán forma piramidal, de tal manera que al ascender un nivel se irá rebajando en uno el número de fardos, así para una base de cinco fardos, el segundo nivel será de cuatro y el tercer nivel de tres fardos.

Longitud mínima de la pila de 2 filas de fardos, cuando se trabaje en los valores de altura ordinarios de 3 niveles (en todo caso se sopesará la estabilidad de la pila, y se rebajará la altura si se estima necesario).

Cuando los paquetes presenten problemas de estabilidad, por ejemplo por humedad o diferencia de altura, se almacenarán preferentemente a un nivel, y si los bultos lo permiten a un máximo de dos niveles. En este caso, siempre que las necesidades de producción lo permitan, es preferible enviarlos directamente a la alimentación del púlper.

Las pilas se formarán en las zonas de almacenamiento delimitadas para tal efecto, no debiendo constituir apilamientos en los pasillos destinados a circulación de vehículos.

Cuando el almacenamiento se realice en bloque, se podrán alcanzar los 4 niveles a una altura máxima de 7,2 m, siempre que el número y características de los fardos permitan una base adecuada y la estabilidad no esté comprometida, en cuyo caso se rebajará la altura del bloque en un nivel.

Los apilamientos de fardos en zonas exteriores deben respetar un tamaño máximo de pila de 750 Tm.

Colocación de las pilas y limitación de tamaño

Los pasillos principales, destinados a la circulación de camiones, tendrán una anchura mínima de 8 metros.

Los pasillos secundarios, destinados a la circulación de carretillas, una anchura mínima de 4,5 metros.

La separación entre las distintas pilas en un almacenamiento adosado será como mínimo de 1 m y en bloque 30 cm como máximo entre las columnas.

- **Organización de las zonas de almacenamiento**

En la zona de descarga de camiones, deberá quedar definida una anchura mínima de 16 metros, que asegure un área suficiente para las maniobras de carretillas y camiones.

Se aplicarán criterios similares a los indicados para los fardos de papel recuperado.

1.3.2.2. Apilamiento de láminas de pasta sobre palets

- **Modo de almacenamiento**

Los apilamientos se realizarán preferentemente en el modo de bloque.

Limitación de la altura y del peso de las pilas

La altura máxima de la pila será de dos niveles.



Figura V.1.3: Apilamiento en dos niveles de láminas de pasta sobre palets.



Cuando los paquetes presenten problemas de estabilidad, por ejemplo por humedad o diferencia de altura, se almacenarán a un nivel, y si los bultos lo permiten a un máximo de dos niveles colocando el defectuoso en el segundo nivel. En este caso, siempre que las necesidades de producción lo permitan y se trate de una materia prima, es preferible enviarlos directamente a la alimentación del púlper.

Los apilamientos de fardos en zonas exteriores deben respetar un tamaño máximo de pila de 750 Tm.

Colocación de las pilas y limitación de tamaño

Se aplicarán los mismos criterios que los indicados para el almacenamiento de fardos de pasta.

- **Organización de las zonas de almacenamiento**

Se aplicarán criterios similares a los fardos de pasta.

1.3.3. Apilamiento de bobinas

Para el almacenamiento de bobinas, siempre y cuando no dispongamos de almacén automatizado, seguiremos una serie de criterios generales como, a mayor diámetro de bobina mayor altura, a menor ancho menor altura, con una altura máxima en torno a los 7,50 metros dejando una distancia libre suficiente entre la parte superior de la pila y la parte superior del almacén, o en su defecto, aquella que nos venga dada por la capacidad del equipo de apilado.

1.3.3.1. Almacenamiento sobre el suelo de bobinas sin paletizar

Se señalará de acuerdo con los criterios del *Real Decreto de disposiciones mínimas de señalización de seguridad y salud*, la disposición de las pilas de bobinas y las separaciones.

En el caso de que se pueda ver comprometida la seguridad por la circulación de carretillas en cruces podrán disponerse los extremos de las pilas en forma de chaflán y colocación de espejos curvos.

Se determinará una separación mínima de bobinas a paredes.

Se señalizarán y delimitarán los pasillos peatonales para acceder a los almacenes.

Las bobinas no paletizadas se apilarán verticalmente en todos los casos. En el apilamiento vertical, que en este caso será del tipo “isla” (pilas de un solo elemento en la base, dado que debe dejarse una pequeña separación entre las pilas de bobinas para que las pinzas de las carretillas no dañen las bobinas que se encuentran al lado), se establecerán las siguientes pautas de almacenamiento:

Como norma general, se deben manipular de una en una. Siempre se cogerá la bobina por el centro, sin que la pinza toque el borde.



Figura V.1.4: Almacenamiento de bobinas sin paletizar sobre el suelo

La Altura del apilado estará en función del diámetro y del ancho de la bobina, con el fin de que tengan estabilidad y no se pueda producir un desplazamiento de las mismas. Es decir, a mayor diámetro de bobina mayor altura, a menor ancho menor altura, no sobrepasando nunca una altura máxima de 7,50 metros o en su defecto, aquella que nos venga dada por la capacidad del equipo de apilado. Para bobinas de diámetro entre 60 y 90 cm la altura de apilado deberá disminuirse hasta un máximo de 5,0 m. Para las bobinas de 40 a 60 cm no se almacenarán a más de dos alturas y para bobinas inferiores a 40 cm no se apilarán en altura.

Se deberá tener en cuenta también el propio peso de la bobina en relación con la resistencia estructural del suelo, así como de las bobinas.



Así mismo, cuando se apilen distintos tipos de bobinas, siempre se colocarán las de menor diámetro sobre las de mayor diámetro.

Las zonas de apilamiento quedarán delimitadas y señalizadas en el suelo.

El personal encargado de la manipulación y almacenamiento del producto acabado, procederá a la colocación del mismo en el almacén, por lotes homogéneos.

Las pinzas de las carretillas deben mantenerse en posición vertical cuando se transporte. No se girarán las pinzas con la carretilla en movimiento.

No debe soltarse la bobina antes de que se haya apoyado en el suelo o sobre otra bobina.

No debe utilizarse una bobina para empujar a otra.

No se transportarán bobinas sin paletizar que no estén abrazadas con la pinza.

Las bobinas sin paletizar se transportarán en vertical siempre que su altura permita la total visión del campo delantero. Si la altura de la bobina o bobinas dificultara el campo de visión del carretillero, éstas se transportarán marcha atrás. Nunca se transportarán en posición horizontal pues en caso de caída de la bobina, por ejemplo por fallo del sistema hidráulico, la bobina saldría rodando.

Cuando se transporten bobinas de 2 m. de ancho o más, se cogerán del centro de la bobina.

Al coger una bobina con la pinza, no se girará la pinza a la vez que se baja la bobina.



Figura V.1.5: Carretilla con pinzas sujetando una bobina

Prevaleciendo lo anterior, si por alguna circunstancia no se tuviera total campo de visión, el transporte de bobinas se efectuará con la carga en posición vertical y la carretilla marcha atrás. Es especialmente importante, por el riesgo de vuelco, no girar la carretilla cuando se transporta una bobina elevada.

1.3.3.2. Almacenamiento en pilas paletizadas en horizontal sobre el suelo

Las bobinas paletizados en horizontal, deberán estar calzadas y fijadas al palet con flejes.

En los almacenamiento sobre el suelo de pilas paletizadas, las bobinas se apilarán preferentemente a una altura máxima de tres palets de forma que la segunda altura del palet este apoyada sobre dos de los palets inferiores para obtener una mayor estabilidad de la pila.

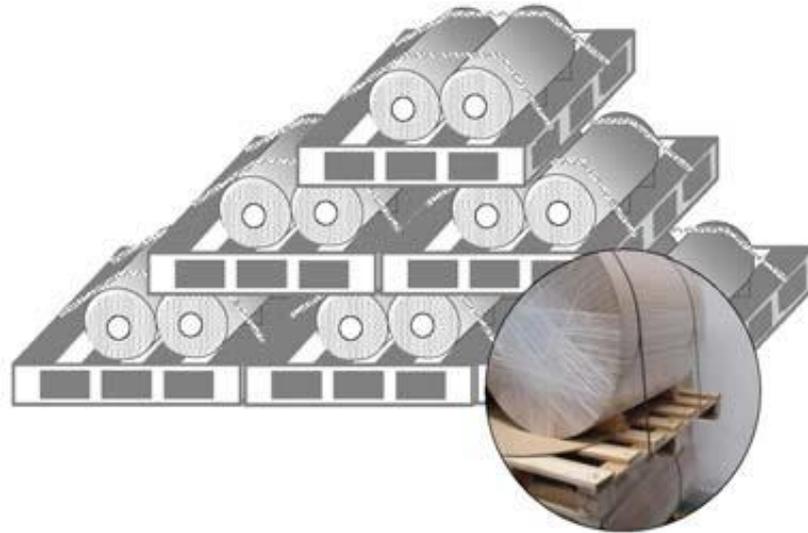


Figura V.1.6: Almacenamiento de bobinas en horizontal sobre palets con flejes.

No obstante en algunas ocasiones tales como en los trabajos de organización y selección de pedidos, puede apilarse palet sobre palet en dos alturas. En estos casos deberá tenerse muy en cuenta los puntos de apoyo y la verticalidad del eje de las carga en cada uno de los apoyos, de tal manera que no queden desplazados los palets en ninguno de los sentidos.



Figura V.1.7: Carretilla transportando bobinas en horizontal sobre un palet.

No se transportarán bobinas sobre palet en horizontal si estas no están suficientemente calzadas y fijadas con flejes.

1.3.3.3. Almacenamiento en pilas sin paletizar en horizontal sobre el suelo

Normalmente este tipo de almacenamiento viene determinado por la maquinaria y medios disponibles en la planta de producción. Para este tipo de almacenamiento es preciso calzar siempre las bobinas con calzos adecuados al tamaño de las bobinas. Para ello se pueden utilizar calzos de maderas duras, de goma o metálicos.

Se debe tener en cuenta que los calzos de madera dura pueden volverse resbaladizos por que se deberá de vigilar este punto.

Para el apilado de bobinas en horizontal se deberá situar en la parte inferior las bobinas de mayor tamaño y apilar siempre en forma piramidal no sobrepasando nunca los 5 m de altura.

1.3.3.4. Sistemas automáticos de almacenamiento de bobinas de papel

En algunos casos se dispone de sistemas automáticos para la distribución y almacenamiento de bobinas de papel. En algunos casos las bobinas se apilan directamente sobre el suelo con apilamientos en forma de bloque. En otros casos el almacén consiste en una estructura metálica que contiene una unidad de control, sensores y un mecanismo de ascenso /descenso de uno o varios contenedores o barras para el alojamiento de bobinas cada. El objeto es almacenar bobinas de papel en varios niveles de altura sin la necesidad de equipamiento auxiliar o externo. Cuando el sistema se encuentra descargado estos contenedores o las bobinas normalmente se localizan en la parte inferior de la estructura. Al ingresar una bobina, la unidad de control habilita las funciones para poder elevar el contenedor o bobina y alojarla en el lugar habilitado para ello.

En este tipo de almacenamientos, la altura estar limitada por las características de la estructura metálica y en caso de realizarse

sobre el suelo por las de las propias bobinas a apilar. En este último caso, sistemas automáticos de almacenamiento con grúas inteligentes, la altura de apilamiento puede llegar a 15 o más metros ya que la única limitación es la altura del edificio y la propia estabilidad de las bobinas.



Figura V.1.8: Sistema automático de almacenamiento de bobinas en vertical.

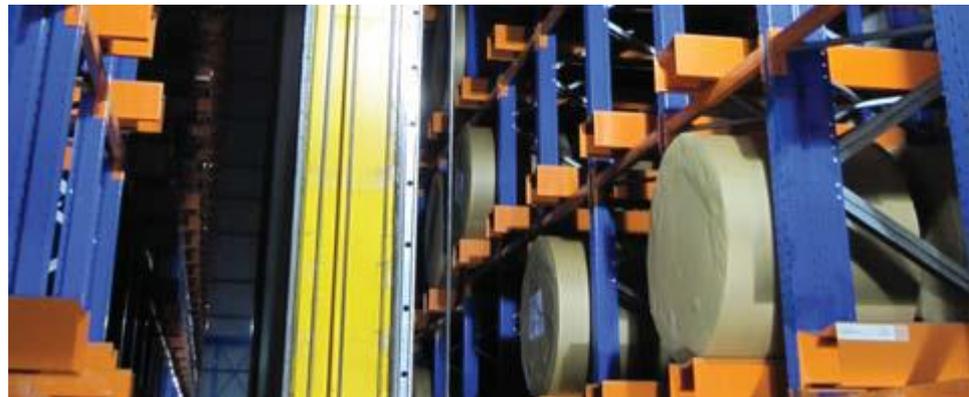


Figura V.1.9: Sistema automático de almacenamiento de bobinas en horizontal

En este tipo de almacenes automatizados estará rigurosamente prohibida la entrada y únicamente se accederá cuando la instalación esté descargada de cualquier tipo de energía. Por ello se debe disponer de un estricto procedimiento para la

consignación y des consignación de la instalación para trabajos que requieran de acceder a su interior, como pueden ser de mantenimiento o control de inventarios.

2. Equipos y máquinas

Para la manipulación de los productos anteriormente descritos, se hace necesaria la utilización de equipos y maquinaria especial, sin la que no serían posibles las labores de traslado y de almacenamiento.



Figura V.2.1: Carretilla elevadora.

Entre la maquinaria utilizada para el transporte y almacenamiento en los trabajos que se realizan en la industria papelera destacan por su diversidad, complejidad y frecuencia de uso las siguientes:

- Palas cargadoras
- Carretillas elevadoras
- Grúas móviles
- Plataformas elevadoras

Las máquinas automotoras comercializadas o puestas en servicio deberán cumplir con el contenido del Real Decreto por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas. No obstante, las máquinas en uso que inicialmente careciesen de marcado CE por haberse comercializado con anterioridad a enero del 95, estarán adecuadas a los requisitos fijados en el Anexo I del RD 1215/1997 y



utilizarse siguiendo los criterios fijados en el Anexo II del citado RD. Por otra parte, de acuerdo con el RD 212/2002, las máquinas que trabajan a la intemperie también deben llevar en lugar visible el etiquetado de nivel sonoro con indicación del nivel acústico garantizado de la máquina en el entorno.

Los trabajos que se realizan con la utilización de esta maquinaria, pueden conllevar riesgos asociados, por lo que en el presente apartado nos centraremos en el análisis de los riesgos y en la descripción de las medidas preventivas, en relación con los tres aspectos esenciales y necesarios para la realización de las tareas:

- El operador de la máquina
- La máquina, la actividad laboral y el entorno.
- Las tareas asociadas a la utilización.

2.1. Formación del operario

Los operadores de las máquinas deberán tener una formación adecuada y suficiente, así como una certificación de aptitud médica para poder desarrollar este tipo de trabajo. Así mismo deberán someterse a los exámenes periódicos de salud, que tengan carácter obligatorio, previstos por el Servicio de Prevención.

De acuerdo con la Art.5.2 y el punto 2.1 del RD 1215/97, la utilización de los equipos quedará reservada a aquellos trabajadores autorizados por el empresario en base a la formación tanto teórica como práctica y además específica de las tareas a realizar en las instalaciones. Además, es conveniente la existencia de un listado, conocido por los trabajadores, del personal autorizado para el uso de estos equipos, de manera tal que no haya dudas de quien los puede utilizar y para que tareas.

Debe tenerse en cuenta que no es extraño que, en puestos de trabajo donde se utilizan este tipo de maquinarias, sea necesario realizar manipulaciones manuales de cargas, por lo que en este caso se deberá además prever la formación específica a la que se refiere el Art.4 del RD 487/97.

La formación del conductor de la máquina, deberá ser específica y adaptada al tipo de maquinaria a utilizar, de manera que le faculte para su pilotaje y manipulación. La acción formativa incluirá así mismo los elementos y accesorios complementarios susceptibles de utilización, y la



normativa de prevención de riesgos laborales tanto básica, como la que expresamente afecta a esta actividad laboral.

Si la actividad se realizase en las vías públicas, además deberá contar, al menos, con el permiso de circulación de categoría E.

Así mismo, sería recomendable una formación complementaria sobre conducción de vehículos y sobre mecánica, electricidad, hidráulica y neumática aplicada al mantenimiento de máquinas.

Por otra parte, deberá contar con la información necesaria y suficiente de las características de las tareas a desarrollar, y conocer los procedimientos de trabajo y las normas tanto preventivas como operativas de la instalación o de la zona o zonas de trabajo afectadas por la actividad que desarrolla.

Carné de operador de grúa móvil autopropulsada

Para el montaje y manejo de las grúas móviles autopropulsadas a las que se refiere la correspondiente ITC, se exigirá la posesión del carné de operador de grúa móvil autopropulsada de, al menos, categoría igual o superior a la correspondiente a su carga nominal, obtenido de acuerdo con lo señalado en este anexo. El carné que se establece se delimita en las siguientes categorías:

- Categoría A: Habilita a su titular para el montaje y manejo de grúas móviles autopropulsadas de hasta 130 Tm. de carga nominal, inclusive.
- Categoría B: Habilita a su titular para el montaje y manejo de grúas móviles autopropulsadas de más de 130 Tm. de carga nominal.

2.2. Mantenimiento y reparación

Las labores de mantenimiento y reparación las realizará el personal competente, de acuerdo a las periodicidades e instrucciones marcadas por el fabricante en el manual de mantenimiento, en el que el constructor recomienda los tipos de aceites y líquidos hidráulicos que han de utilizarse y se indican las revisiones y plazos con que han de efectuarse.

Se dispondrá de un historial de mantenimiento que permanecerá actualizado y en él se consignará el nombre y el cargo de la persona que lo realiza. Deberá designarse una persona responsable para la custodia del diario de mantenimiento.



Durante las operaciones de mantenimiento o reparación, no se utilizará ropa holgada, ni joyas o colgantes en el cuerpo, y se utilizarán los equipos de protección adecuados, la máquina debe estar estacionada en un terreno llano, con el freno de estacionamiento, la palanca de marchas en punto muerto, con el motor parado y la batería desconectada.

En las labores de mantenimiento y/o reparación:

- Las tareas de mantenimiento y reparación se realizarán con el motor apagado y la grúa estabilizada y frenada en todas sus posiciones. Debe enclavarse la máquina antes de iniciar cualquier trabajo sobre la misma.
- Nunca se retirarán los protectores de órganos mecánicos en movimiento y deben protegerse las zonas de la máquina que pudieran dar lugar a atrapamientos, antes de hacer cualquier manipulación.
- No se realizará ningún trabajo sobre la máquina, estando esta en movimiento.

Nunca se dejarán objetos, trapos etc. en el suelo de la cabina ni en el compartimento del motor. Las herramientas se guardarán en su caja.

Con objeto de evitar vibraciones, se revisarán los posibles desequilibrios y desajustes del motor o de las partes móviles de la máquina, así como los sistemas amortiguación.

En el caso de las grúas móviles, además de seguir las instrucciones contenidas en el Manual de Mantenimiento, es de vital importancia revisar periódicamente los estabilizadores, prestando particular atención a las partes soldadas por ser los puntos más débiles de estos elementos, que han de verse sometidos a esfuerzos de especial magnitud.

Cualquier defecto debe ser evaluado por personal cualificado y determinar si constituye un riesgo para la seguridad del equipo. Todos los defectos detectados que puedan afectar a la seguridad deben ser corregidos antes de utilizar el equipo.

2.3. Instrucciones comunes a la utilización de todas las máquinas

Además de las normas específicas para la utilización de cada una de las máquinas, deberán cumplirse, en todos los casos, las siguientes instrucciones:

- No tomar medicamentos sin prescripción facultativa, especialmente tranquilizantes.



- No ingerir bebidas alcohólicas antes y ni durante el trabajo
- No realizar carreras, ni bromas a los demás conductores.
- Estar únicamente atento al trabajo.
- Solo podrá manejar las máquinas, el personal autorizado por la empresa con la formación teórico-práctica adecuada, suficiente y específica.
- Está terminantemente prohibido la retirada o modificación de los elementos de protección de las máquinas.
- Nunca se utilizarán las máquinas para el transporte o elevación de personas tanto en la cabina como en ninguna de sus partes.
- Nunca se sobrepasará la capacidad máxima de carga recogida en las indicaciones de diseño de la máquina.
- Nunca se manipularán cargas por encima de personas. Nunca se permitirá que nadie se sitúe cerca de la carga y menos que circule por debajo de ella.
- Debe informarse puntualmente al responsable de patio de las incidencias que se produzcan durante su trabajo, entendiendo como tales, cualquier circunstancia que dificulte el cumplimiento de las normas de seguridad.
- Se conocerán y cumplirán las normas de circulación en la zona de trabajo, las señales y balizamientos utilizados tales como: banderolas, vallas, señales manuales, luminosas y sonoras.
- Deben realizarse las revisiones descritas específicamente tanto para el inicio de la jornada, como las descritas en el manual de la máquina. Así mismo, se revisarán periódicamente las zonas de trabajo.
- Las inspecciones deben renovarse todas las veces que sean necesarias (las diarias al inicio de cada turno) y fundamentalmente cuando haya habido un fallo en el material, en la máquina, en las instalaciones o en los dispositivos de seguridad, habiéndose producido o no un accidente.
- Todos estos exámenes los realizará el encargado o el personal competente designado por el mismo. El nombre y el cargo de esta persona se consignarán en un libro de registro de seguridad y deberá designarse una persona responsable de su custodia.
- Con objeto de evitar riesgos ergonómicos, así como los derivados de un posible estrés térmico o de fatigas, deberá atenderse a las siguientes indicaciones:
 - Ajustar la organización del trabajo y realizar pausas.
 - Asegurar una ventilación suficiente en la cabina en épocas calurosas del año.
 - El asiento del conductor tendrá un diseño ergonómico y podrá ajustarse en altura, inclinación, etc..
 - Los mandos estarán diseñados ergonómicamente.



- Se deben extremar las precauciones cuando se accede a repostar combustible:
 - Se realizará la carga con el motor parado y lejos de cualquier fuente de calor. No se utilizarán, mientras se realiza la carga, teléfonos móviles.
 - La persona que realiza la cargase se colocará a favor del viento para evitar quedar salpicado por el carburante.
 - Debe asegurarse de que el tapón del depósito quede perfectamente encajado.

- Cuando el operador se incorpora a la cabina deberá:
 - Verificar la regulación del asiento.
 - Verificar el estado del extintor y regular los espejos retrovisores.
 - Colocar todos los mandos en punto muerto.
 - Sentarse antes de poner en marcha el motor.
 - Ponerse el cinturón de seguridad.
 - Verificar que las indicaciones de los controles son normales.

- Una vez se ha puesto el motor en marcha, es conveniente que se comprueben en vacío los mandos de maniobra y de parada.
- Es responsabilidad del maquinista, que la carga que transporta se manipule cuando se halle segura y no exista riesgo de caída de la misma.
- Siempre debe respetarse la distancia de seguridad con los demás vehículos.
- Se cederá el paso a los peatones que se encuentren en el recorrido.
- Las zonas de trabajo deben contar con una señalización apropiada y los sentidos de la circulación deben estar ordenados y señalizados.
- Es obligatorio respetar la señalización de tráfico existente en fábrica, y las limitaciones de velocidad establecidas en el recinto. Si es preciso, se colocarán limitadores.
- Debe establecerse un buen mantenimiento y una buena iluminación de las zonas de trabajo.
- Todos los locales y áreas de trabajo dispondrán de ventilación adecuada, y no es recomendable trabajar en recintos cerrados o mal ventilados con máquinas de motor de combustión.
- Durante la utilización de estos equipos y maquinaria no se permitirá la utilización de auriculares ni teléfonos móviles.

2.4. Palas cargadoras

Las palas cargadoras utilizadas en la industria papelera (palas cargadoras frontales o simplemente cargadoras), son máquinas automotoras que, teniendo como base un tractor sobre ruedas de neumáticos (a veces sobre un sistema de oruga), están equipadas de una cuchara o de palas cuyo movimiento de elevación se logra mediante brazos articulados.

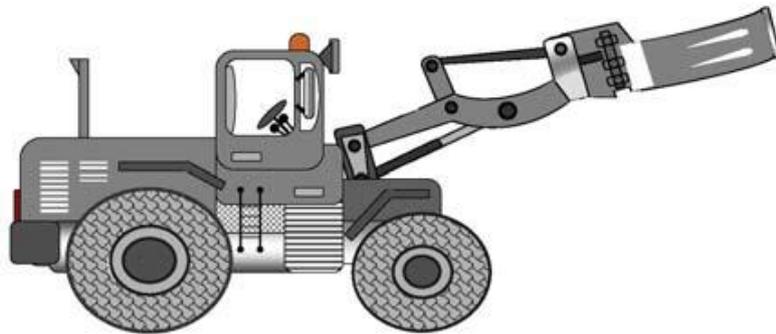


Figura V.2.2: Pala cargadora con pinzas para bobinas

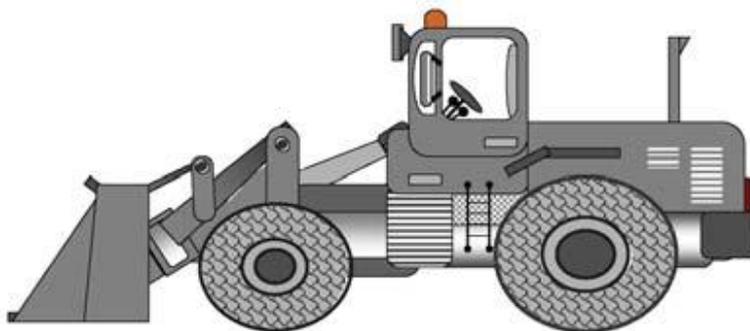


Figura V.2.3: Pala cargadora de cuchara

La utilización de este tipo de maquinaria en la industria papelera se centra principalmente en la descarga y apilamiento de bultos de papel recuperado, alimentación de púlper, apilamiento de bobinas de papel y la recogida de rechazos de los púlper y llenado de contenedores o camiones.

Antes de iniciar el trabajo con la máquina, y preferiblemente en cada turno, deberán realizarse al menos las siguientes actuaciones:

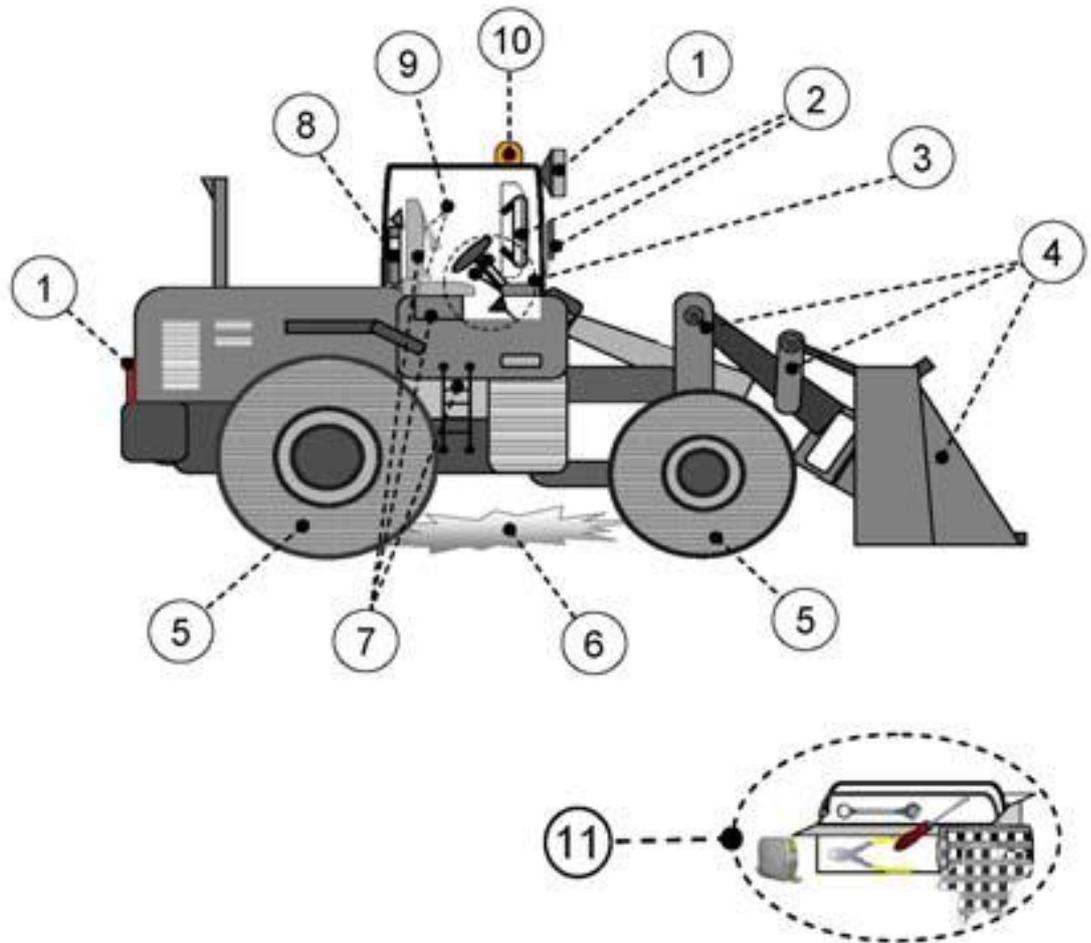


Figura V.2.4: Desglose de los elementos a comprobar en una pala cargadora

1. Comprobar el estado de los faros, de las luces de posición, de las de parada, de los intermitentes y del claxon.
2. Limpiar el parabrisas y el limpiaparabrisas, los espejos retrovisores y todo aquello que pueda reducir la visibilidad. No debe haber zonas acristaladas rotas.
3. Comprobar el grado de respuesta de los mandos de maniobra y del transmisor – receptor de comunicación.
4. Inspeccionar el estado de las pinzas o de la cuchara de elevación y de los mecanismos y circuitos hidráulicos.
5. Comprobar los neumáticos en cuanto a posibles cortes, erosiones, etc., el estado de presión y la banda de rodadura.
6. Comprobar los niveles de agua y aceite y mirar alrededor de la máquina para comprobar posibles fugas, piezas en mal estado, etc.



7. El puesto del conductor debe estar limpio, sin grasa, aceite o barro en el suelo, las zonas de acceso a la cabina limpias, y fijos y limpios los agarraderos y las puertas. Hacer las mismas comprobaciones si hay agua o nieve.
8. Comprobar el estado del extintor
9. Comprobar el estado del cinturón de seguridad.
10. Comprobar el funcionamiento del avisador luminoso y del avisador acústico.
11. Nunca se dejarán objetos, trapos u otros elementos en el suelo de la cabina ni en el compartimento del motor. Las herramientas se guardarán en su caja.

De las comprobaciones anteriores es conveniente cumplimentar un parte de revisión. La periodicidad para la cumplimentación del registro de revisiones se establecerá en función de las circunstancias de utilización de cada máquina. Así por ejemplo, cuando la utilización de la maquinaria se realice en un régimen de turnos es conveniente que en cada cambio de turno se realicen las revisiones anteriores y se realice por parte del turno entrante la recepción de la maquinaria.

- **Medidas a tomar durante el trabajo**

- Antes de iniciar una tarea, deben analizarse las maniobras a realizar.
- Deberán seguirse los procedimientos de trabajo establecidos.
- Con objeto de corregir cualquier deficiencia que se produzca en el apilado de los elementos a manipular y que pudiera dar lugar a la caída de éstos o al desmoronamiento de las pilas, los palistas avisarán al Jefe de Patio de cualquier deficiencia que observen.
- Debe vigilarse, cuando haya personas dentro de la zona de trabajo, que estén siempre a la vista, no maniobrando en tanto no se asegure que o hayan abandonado la zona o estén dentro de la misma sin moverse y a la vista del palista. No se permitirá la estancia o el paso de personas en la zona de influencia de la máquina.
- Nunca se maniobrarán la carga por encima de las personas o de la cabina del camión.
- Se mantendrá una buena iluminación de la zona de trabajo y se delimitará la zona de operación de las máquinas.
- No se estacionarán otras máquinas en la zona de influencia de la que se encuentra trabajando.
- No debe trabajarse en ningún caso en pendientes superiores al 50%.
- Se balizarán y acotarán las zonas de taludes y los desniveles.



- Si la máquina empieza a inclinarse hacia adelante, debe bajarse la cuchara rápidamente para volverla a equilibrar.
- No estará permitido bajar pendientes con el motor parado o en punto muerto.
- Cuando las operaciones comporten maniobras complejas o peligrosas, el maquinista tiene que disponer de un señalista experto que lo guíe. En estos casos el maquinista, nunca perderá de vista al señalista y nunca dejará que este manipule los mandos.
- No deben pasarse nunca la cuchara o las palas por encima de la cabina del camión.
- Es responsabilidad del palista que el conductor del camión durante las operaciones de descarga, cumpla con las normas descritas en el procedimiento correspondiente.
- Es obligación del maquinista asegurarse de que los implementos de la máquina estén bien fijados.
- Deben evitarse los movimientos bruscos.
- Para evitar la entrada de partículas, se cerrará la cabina y si es posible, se realizará la carga o descarga a favor del viento y sin sobrecargar el cucharón de la máquina. También, si fuera posible, podría regarse la zona de trabajo y en su caso la carga (virutas, astillas, etc.). Si es necesario, se utilizarán protecciones respiratorias adecuadas.
- Es obligatorio el uso de luz rotativa o destellante de forma continua durante todos los turnos de trabajo y luminosa cuando la luz diurna sea de poca intensidad, amanecer, atardecer, días cubiertos, nieblas, y siempre que se circule con la pala por el exterior del parque.
- El implemento durante los desplazamientos debe llevarse en posición de transporte (descendido y a unos 30 – 40 cm. sobre el suelo), y estar totalmente inclinado hacia atrás. Nunca circulará con las palas o la cuchara elevadas por encima de la altura indicada.
- En el caso de tener que realizar algún movimiento de balas para limpieza o barrido del patio, se tendrá en cuenta que los alambres en ningún caso pueden rozar con el suelo para evitar crear fuentes de calor e incendios.
- Encender los faros al final del día para ver y ser visto.
- Los parques de carga y descarga deberán estar situados a una distancia suficiente las líneas eléctricas aéreas, que permita una seguridad activa. No obstante, si esto no fuera posible, se señalarán las zonas de riesgo, se seguirán los procedimientos de trabajo establecidos y se observarán rigurosamente las distancias de seguridad:
 - Hasta 1000V: 2 metros.
 - De 1000V a 60.000V: 3 metros.

- Más 60.000V: 5 metros
- El abandono de la máquina se realizará siguiendo las mismas instrucciones que se describen a continuación para la finalización del trabajo.

- **Medidas al finalizar el trabajo**

Una vez finalizado el trabajo y antes de abandonar la máquina, se tendrán en cuenta las siguientes actuaciones:

- La máquina se parará en terreno llano con el equipo apoyado en el suelo, los calzos puestos y de acuerdo a las indicaciones recogidas en el manual del fabricante. Preferentemente, debe establecerse una zona delimitada para su estacionamiento.
- Se parará el motor, se quitará la llave de contacto y se colocarán todos los mandos en punto muerto.
- Se colocará el freno de parada, se calzará la máquina y se desconectará la batería.
- Se cerrará la puerta de la cabina y el compartimento del motor.
- De la máquina se bajará utilizando las empuñaduras y los escalones diseñados para este fin y siempre se cara a la máquina.
- El suelo donde se estacione la máquina deberá ser firme y seco. Nunca debe estacionarse la máquina en terreno con barro o con agua, especialmente en invierno, dado que, las heladas, pueden dañar los neumáticos.
- Deben quedar establecidos de forma constatable, tanto la persona responsable, como el procedimiento para la custodia de las llaves de la máquina.

2.5. Carretillas elevadoras

Las carretillas elevadoras son unas de las máquinas más comúnmente utilizadas, para el transporte de mercancías en las instalaciones papeleras. Dentro de esta denominación, se encuentra todo equipo autopulsado con conductor a pie o montado, ya sea sentado o de pie, sobre ruedas, que no circula sobre raíles, con capacidad para autocargarse y destinado al transporte y manipulación de cargas vertical u horizontalmente. También se incluyen en este concepto las carretillas utilizadas para la tracción o empuje de remolques y plataformas de carga.



Figura V.2.5: Carretilla elevadora dotada con horquillas.



Figura V.2.6: Carretilla elevadora dotada con pinzas.

Las carretillas elevadoras pueden estar dotadas de horquillas para el transporte de bultos paletizados o de pinzas usadas para el transporte y apilamiento de bultos como papel recuperado, fibra de pasta o para manipulación de bobinas.

- **Medidas a tomar antes de la utilización de la máquina**

Antes de iniciar el trabajo con la carretilla, en cada turno, deberán revisarse, al menos los siguientes aspectos:

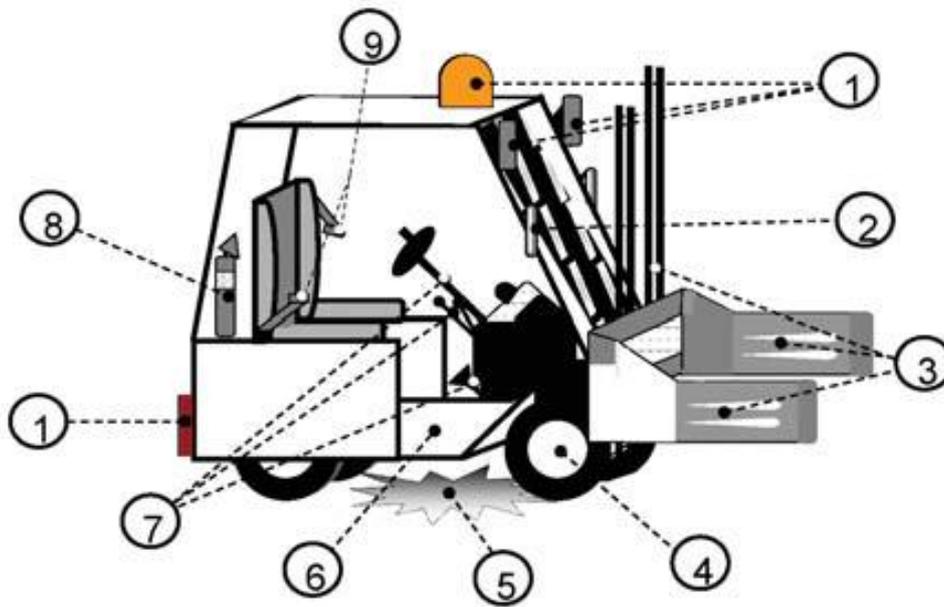


Figura V.2.7: Desglose de los elementos a comprobar en una carretilla elevadora

1. El funcionamiento del avisador luminoso, del avisador acústico y de las luces.
2. El estado de los espejos retrovisores.
3. El estado del mástil y de la horquilla, y el funcionamiento de los sistemas de elevación e inclinación.
4. La presión y el estado de los neumáticos.
5. La existencia de posibles fugas.
6. El estado de la batería y los elementos y circuitos de las baterías y, en carretillas con motores de explosión, se comprobarán los niveles de agua, aceite y combustible. Así mismo se revisará el estado del depósito y los acoplamientos de combustible.
7. El estado de la dirección y de los frenos de inmovilización y de servicio.
8. El estado del extintor.
9. El estado de cinturón de seguridad.
10. Otros aspectos tales como la posible rotura de cristales y/o la presencia de daños en el pórtico y en la carrocería en general.
11. Las carretillas es conveniente que estén dotadas de depurador gases de escape/partículas.

De las comprobaciones anteriores es conveniente cumplimentarse un parte de revisión. La periodicidad para la cumplimentación del registro de revisiones se establecerá en función de las circunstancias de utilización de cada máquina. Así por ejemplo, cuando la utilización de la maquinaria



se realice en un régimen de turnos es conveniente que en cada cambio de turno se efectúen las revisiones anteriores y se realice por parte del turno entrante la recepción de la maquinaria.

Otros aspectos a considerar son los siguientes:

- Deben estudiarse las zonas de posible deslumbramiento y prevenir su aparición.
 - El nivel de iluminación de los pasillos y de zonas interiores será como mínimo de 100 lux.
 - El espacio para el tránsito y las maniobras de las carretillas deberá ser suficiente.
 - Para facilitar las maniobras marcha atrás, se podrá dotar al asiento del operador de un sistema que permita un giro de unos 30°.
 - Las salidas de peatones del interior de locales deberán estar protegidas mediante vallas.
 - Debe dotarse a la carretilla de dispositivo antivuelco (ROPS).
 - Debe dotarse a la carretilla de un sistema limitador de carga.
 - Las carretillas de motor térmico deben estar dotadas de un dispositivo de retención de chispas (apagallamas) a la salida del tubo de escape.
- **Medidas a tomar durante el trabajo**
 - El operador usará siempre cinturón de seguridad o dispositivo de retención.
 - El ascenso y descenso de la carretilla se hará siempre de cara a esta.
 - Al bajar de la carretilla debe asegurarse que los mandos están en punto muerto y que se ha puesto el freno de estacionamiento.
 - Siempre se circulará sentado en el asiento y con el cinturón de seguridad abrochado.
 - Nunca se subirá o bajará de la carretilla en marcha.
 - No se utilizarán las carretillas para la elevación de personas, tanto directamente sobre las palas, como sobre palets, o para su transporte en la cabina o en cualquier otra parte de su estructura.
 - Los equipos usados con carretillas elevadoras para elevación de personas, como plataformas de trabajo elevadas sobre las uñas, no están incluidos dentro del ámbito de aplicación de la directiva de máquinas y por tanto no llevarán el marcado "CE". Su uso sería únicamente aceptable cuando lo sea con carácter excepcional y siempre será precisa una evaluación de riesgos previa para determinar que los riesgos son menores que utilizando equipos de elevación de personas y que el trabajo puede ejecutarse de manera segura. Estos equipos nunca podrán ser usados en operaciones rutinarias o repetitivas.



- Durante la carga o descarga ninguna persona permanecerá en las zonas de influencia de la carretilla.
- Siempre se asegurará que la carga está proporcionada a la capacidad de la carretilla y que está bien colocada. El número de bobinas que se puedan manejar simultáneamente vendrá determinado por las especificaciones del equipo definidas por el fabricante, así como de las características propias de las mismas.
- Para afianzar la carga de bobinas en horizontal, se colocarán calzos, fijados con clavos, en las últimas bobinas.
- Para la carga de bobinas verticales se desmantelarán los laterales y los piquetes.
- El carretillero estará obligado a detener su marcha y si apreciase que en su entorno permanece alguna persona.
- Durante la carga o descarga de camiones en el exterior:
 - Nadie permanecerá en los alrededores del camión, excepto el propio conductor y/o el personal de Expediciones si se requiere, que estarán siempre a la vista del carretillero y en los lugares definidos para ellos.
 - Nunca se manipulará la carga por encima de personas o de la cabina del camión.
 - Cuando proceda, la descarga se realiza por ambos lados del camión. Queda prohibido el uso de eslingas o barras para arrastrar las paletas por el suelo del camión.
 - Bajo ninguna circunstancia se iniciará o continuará la carga del camión si alguna persona está sobre la plataforma del mismo.
 - Durante la carga o descarga, el camión permanecerá con el freno de mano, la velocidad metida e inmovilizado con calzos manuales o sistemas automáticos.
 - Las indicaciones de trabajos con carretillas elevadoras en muelles de carga, se tratarán más específicamente en el apartado 6 (tareas de almacén).
- El operador utilizará el claxon en cruces sin visibilidad o señalización de paso de carretillas y al entrar/salir de recintos.
- Debe procurarse tener siempre una buena visibilidad del camino a seguir. Si la carga lo impide, circular marcha atrás extremando las precauciones y hacerse acompañar por un operario que ayude a dirigir la maniobra.
- En caso de ser práctica frecuente el transporte de cargas voluminosas, utilizar carretillas de conductor sobreelevado.
- Moderar la velocidad en las zonas con pisos húmedos o resbaladizos.
- Nunca se circulará con la carga elevada. Circular con el mástil inclinado hacia atrás y las horquillas a 15 cm. del suelo (en carga/vacío).

- En el interior de los almacenes no se circulará a más de 10 Km/h de velocidad.
- No se sobrepasarán nunca los límites de carga de la carretilla.
- Con objeto de evitar vuelcos:
 - Debe moderarse la velocidad al girar o tomar una curva (carga/vacío)
 - Debe tenerse especial atención ante la presencia de baches, al circular junto al borde de muelles de carga o de rampas, o al entrar o salir de la caja de camiones.
 - No deben subirse bordillos o desniveles. Usar rampas adecuadas.
 - No se debe circular sobre pisos de insuficiente resistencia.
 - El paso sobre resaltes del terreno se realizará diagonalmente y a poca velocidad.
- Con objeto de evitar la caída de las cargas:
 - La manipulación, posición y transporte de las cargas se realizará de forma correcta:

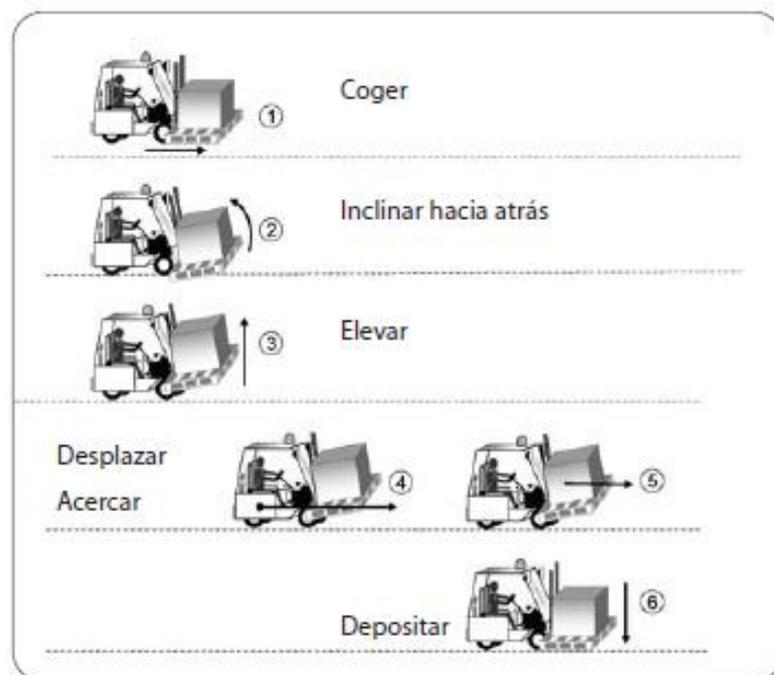


Figura V.2.8: Modo de operar con una carretilla elevadora

- Las cargas se situarán siempre sobre la horquilla de forma que sea imposible su caída (uso de paletas o contenedores y sistemas de fijación adecuados).
- Antes de transportar o elevar una carga, consultar la tabla de características de la carretilla o implemento que utilice.

- Deben manejarse cargas estables y se mantendrá una especial precaución con las cargas voluminosas.
 - Siempre se levantarán las cargas con los dos brazos de la horquilla.

 - En las operaciones en espacios con ruido, si es preciso, se dotará de una cabina insonorizada y/o se utilizarán protectores auditivos. No obstante, se evitarán en lo posible itinerarios próximos a otras máquinas en funcionamiento o el tránsito por zonas con ruido.
 - No es recomendable entrar en recintos cerrados y mal ventilados con carretillas de motor de combustión. En estos lugares se utilizarán carretillas eléctricas.
 - En trabajos en condiciones de lluvia o sol se utilizarán carretillas con techo de protección que no impida la visibilidad.
 - En condiciones climatológicas adversas por frío o lluvia, se utilizará ropa de trabajo apropiada.
-
- **Medidas a tomar al finalizar la tarea**

Una vez finalizado el trabajo y antes de abandonar la carretilla, se tendrán en cuenta las siguientes actuaciones:

- Aparcar la carretilla en un lugar seguro adecuado y sin obstaculizar vías y salidas de evacuación.
- Dejar las horquillas bajadas.
- Dejar los órganos de mando en punto muerto.
- Poner el freno de estacionamiento.
- Apagar el motor y quitar la llave del contacto.
- Bloquear y activar todos los mecanismos para impedir la utilización de la máquina por personal no autorizado.
- Es conveniente colocar calzos en las ruedas, si la carretilla debe dejarse en una pendiente entonces serán de obligado uso.
- Deben quedar establecidos de forma constatable, tanto la persona responsable, como el procedimiento para la custodia de las llaves de la carretilla.

2.6. Grúas Móviles

En el más amplio sentido de su acepción denominaremos grúa móvil a todo conjunto formado por un vehículo portante, sobre ruedas o sobre orugas, dotado de sistemas de propulsión y dirección propios, sobre cuyo chasis se acopla un aparato de elevación tipo pluma.

En el caso de una grúa móvil autopropulsada la ITC INSTRUCCIÓN TÉCNICA COMPLEMENTARIA (ITC) «MIE-AEM-4», REFERENTE A GRÚAS MÓVILES AUTOPROPULSADAS los define como un aparato de elevación de funcionamiento discontinuo, destinado a elevar y distribuir en el espacio cargas suspendidas de un gancho o cualquier otro accesorio de aprehensión, dotado de medios de propulsión y conducción propios o que formen parte de un conjunto con dichos medios que posibilitan su desplazamiento por vías públicas o terrenos. Sera un órgano de aprehensión cualquier dispositivo (gancho, cuchara, electroimán, etc.), que sirve para suspender, coger o soportar la carga. Los equipos empleados en la industria del papel se destinan a la descarga de camiones o ferrocarril y apilamiento de troncos de madera descortezada, siendo el órgano de aprehensión de tipo de pinza.

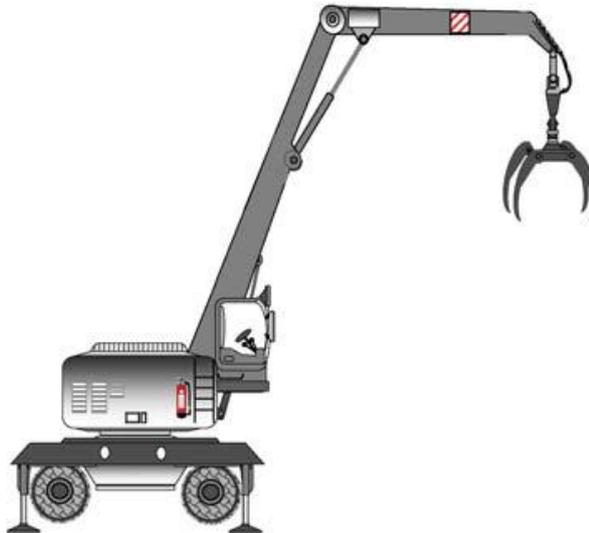


Figura V.2.9: Grúa móvil.

- **Medidas a tomar antes de la utilización de la máquina**

Antes de iniciar el trabajo con la grúa, en cada turno, deberán revisarse, al menos los siguientes aspectos:

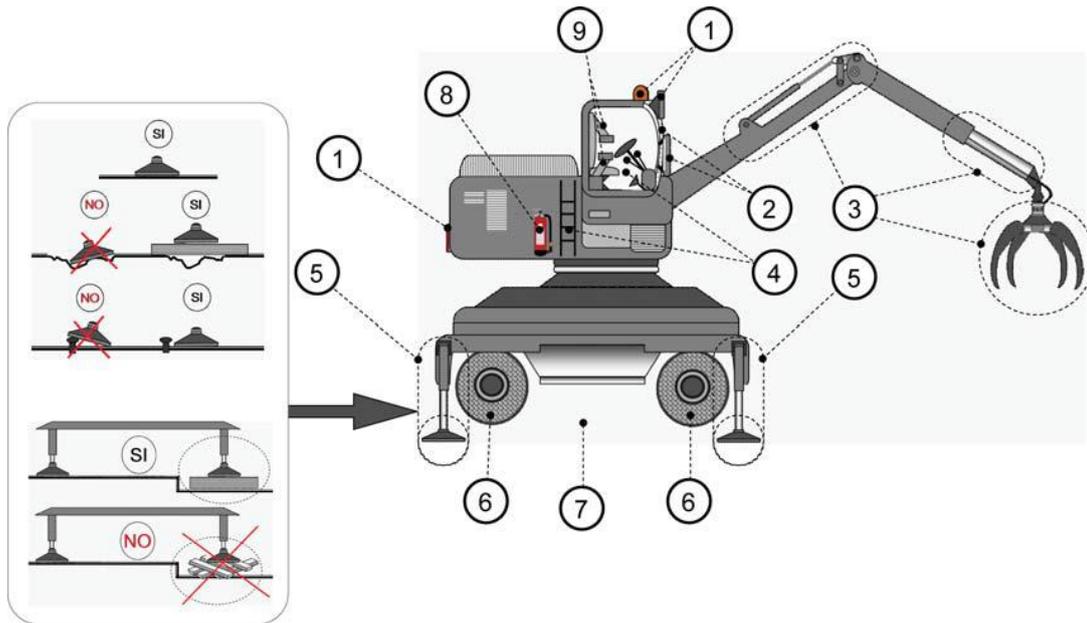


Figura V.2.10: Desglose de los elementos a comprobar en una grúa móvil.

1. Comprobar el estado de las luces, el funcionamiento del avisador luminoso y del avisador acústico.
2. Limpiar el parabrisas, los espejos retrovisores y todo aquello que pueda reducir la visibilidad. No debe haber zonas acristaladas rotas.
3. Comprobar el estado y el grado de respuesta de los mecanismos y circuitos hidráulicos, de los sistemas de extensión y giro, y del gancho.
4. Comprobar el grado de respuesta de los mandos de maniobra y el estado de orden y limpieza de la cabina. El puesto del conductor debe estar limpio, sin grasa, aceite o barro en el suelo, las zonas de acceso a la cabina limpias, y fijos y limpios los agarraderos y las puertas. Hacer las mismas comprobaciones si hay agua o nieve.
5. Comprobar la nivelación de la grúa e Inspeccionar el estado de los estabilizadores y el correcto apoyo en el suelo.
6. Comprobar los neumáticos en cuanto a posibles cortes, erosiones, etc., el estado de presión y de la banda de rodadura.
7. Comprobar los niveles de agua y aceite y mirar alrededor de la máquina para comprobar posibles fugas, piezas en mal estado, etc.
8. Comprobar el estado del extintor polvo polivalente ABC, con eficiencia de Clase I, y de 4 Kg.
9. Comprobar el estado del cinturón de seguridad.
10. Las grúas deberán estar dotadas de depurador gases de escape/partículas.

Otros aspectos a considerar:

Se admite que una grúa es segura contra el riesgo de vuelco, cuando trabajando en la arista de vuelco más desfavorable, no vuelca en tanto se cumplen las condiciones impuestas por su constructor, entendiéndose por arista de vuelco más desfavorable aquella línea definida por dos apoyos consecutivos, cuya distancia a la vertical que pasa por el centro de gravedad de toda la máquina, es menor. Esta distancia para cada posición y alcance de la pluma es más pequeña, cuanto mayor es el ángulo que forma el plano horizontal con el definido por la plataforma base de la grúa y como el momento de vuelco tiene por valor el producto de dicha distancia por el peso total de la máquina, es de vital importancia que su nivelación sea adecuada, para que el mínimo momento de vuelco que pueda resultar sobre la arista más desfavorable durante el giro de la pluma, sea siempre superior al máximo momento de carga admisible, que en ningún caso deberá sobrepasarse.

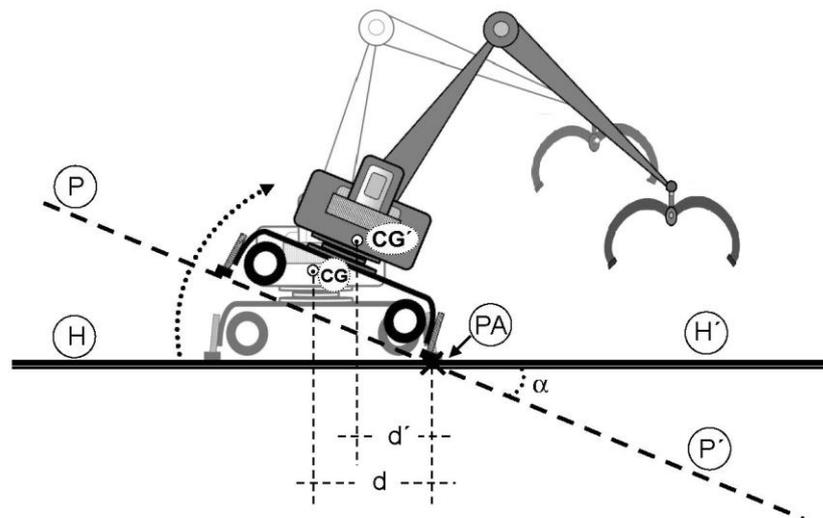


Figura V.2.11: Grúa móvil sobre un plano inclinado.

H-H': Plano horizontal.

P-P': Plano de apoyo.

CG: Centro de gravedad de la máquina.

CG': Centro de gravedad del plano de apoyo.

PA: Punto de apoyo.

d: Distancia desde el centro de gravedad de la máquina al punto de apoyo.



d' : Distancia desde el centro de gravedad del plano de apoyo al punto de apoyo.

α : Ángulo que forma el plano horizontal con el definido por la plataforma base de la grúa (plano de apoyo).

La máquina debe estar dotada de “válvulas de seguridad”, o sistema de válvulas, que provocan el enclavamiento de las secciones de la pluma telescópica, al dejar bloqueados los circuitos hidráulicos cuando se producen fugas en los conductos de alimentación.

Con objeto de evitar riesgos derivados del posible derrumbamiento del terreno:

- Se comprobará que el terreno tiene consistencia suficiente para que los apoyos (orugas, ruedas o estabilizadores) no se hundan en el mismo durante la ejecución de las maniobras.
- El emplazamiento de la máquina se efectuará evitando las irregularidades del terreno y explanando su superficie si fuera preciso al objeto de conseguir que la grúa quede perfectamente nivelada, nivelación que deberá ser verificada antes de iniciarse los trabajos que serán detenidos de forma inmediata si durante su ejecución se observa el hundimiento de algún apoyo.
- Si la transmisión de la carga se realiza a través de estabilizadores y el terreno es de constitución arcillosa o no ofrece garantías, es preferible ampliar el reparto de carga sobre el mismo aumentando la superficie de apoyo mediante bases constituidas suficientemente resistentes (tablones etc.), de al menos 80 mm. de espesor y 1.000 mm. de longitud que se interpondrán entre terreno y los estabilizadores cruzando, en el caso de tablones, ordenadamente, de cada capa sobre la anterior.

Con objeto de evitar riesgos derivados de los Apoyos:

- Cuando la grúa móvil trabaja sobre estabilizadores, que es lo recomendable aun cuando el peso de la carga a elevar permita hacerlo sobre neumáticos, los brazos soportes (si los tuviese) deberán encontrarse extendidos en su máxima longitud y, manteniéndose la correcta horizontalidad de la máquina.
- Se dará a los gatos la elevación necesaria para que los neumáticos queden totalmente separados del suelo.

Con objeto de evitar riesgos por contactos eléctricos, El parque de almacenamiento de troncos se localizará fuera de la zona de influencia de líneas eléctricas, de manera que el extremo de la pluma, o la propia carga, se aproximen a los conductores a una distancia menor de 5 m. si la



tensión es igual o superior a 50 Kv. y al menos de 3 m. para tensiones inferiores, en caso contrarios, se señalizará y acotará la zona como no apta para el apilado.

- **Medidas durante el trabajo**

- Estará absolutamente prohibido que suba a la máquina ninguna persona no autorizada.
- Durante los trabajos solo se encontrará sobre la máquina el gruista. Así mismo está prohibida la elevación de personas con la máquina.
- El gruista deberá tener la mayor visibilidad posible dentro del entorno en que se realizan las maniobras con la máquina, con objeto de evitar los choques del extremo de la carga contra algún obstáculo.
- Debe evitarse la posible producción de chispas por roce o golpeo accidental del gancho con elementos metálicos.
- La ejecución segura de una maniobra exige el conocimiento del peso de la carga por lo que, de no ser previamente conocido, deberá obtenerse una aproximación cubicándola y aplicándole un peso específico por exceso.
- Conocido el peso de la carga, el gruista verificará en las tablas de trabajo, propias de cada grúa, que los ángulos de elevación y alcance de la flecha seleccionados son correctos, de no ser así deberá modificar alguno de dichos parámetros.
- En operaciones de movilización de trocos, la maniobra debe realizarse poniendo en ella una gran atención pues si la carga está aprisionada y la tracción no se ejerce verticalmente, el propio ángulo de tiro puede ser causa de que sobre la arista de trabajo se produzca un momento de carga superior al máximo admisible.
- No obstante, la grúa debe estar dotada de un "Limitador de carga", dispositivo automático de seguridad para grúas telescópicas de todo tipo, que previene contra los riesgos de sobrecarga o de vuelco por sobrepasarse el máximo momento de carga admisible.
- La finalidad de este dispositivo es impedir que se sobrepase la "curva de carga a seguir" indicada por el fabricante. Generalmente actúa emitiendo una señal de alarma, luminosa o sonora, cuando el momento de carga llega a ser el 75% del máximo admisible y bloqueando los circuitos hidráulicos al alcanzarse el 85% del valor de aquél.
- Deben evitarse oscilaciones pendulares que, cuando la masa de la carga es grande, pueden adquirir amplitudes que pondrían en peligro la estabilidad de la máquina, por lo que en la ejecución de toda maniobra se adoptará como norma general, que el movimiento de la carga, a lo largo de aquella, se realice de forma



armoniosa, es decir sin movimientos bruscos, pues la suavidad de movimientos o pasos que se siguen en su realización, inciden más directamente en la estabilidad que la rapidez o lentitud con que se ejecuten.

- Cuando el viento es excesivo, el gruista interrumpirá temporalmente su trabajo y asegurará la flecha en posición de la marcha del vehículo portante.
- El agarre de los troncos se realizará por la zona más próxima a su punto medio, de manera que se mantenga en lo posible la horizontalidad.
- Durante el izado de los troncos se evitará que el gancho alcance la mínima distancia admisible al extremo de la flecha, con el fin de reducir lo máximo posible la actuación del dispositivo de Fin de Carrera, evitando así el desgaste prematuro de contactos que puede originar averías y accidentes.
- La velocidad de la maniobra debe ser moderada tanto al inicio como en su finalización, evitando los desplazamientos pendulares de la carga. Nunca deben realizarse contramarchas y las maniobras tanto de elevación y descenso de carga, como de giro, se realizarán de forma progresiva.
- En caso de contacto de la flecha o de la carga con una línea eléctrica en tensión, como norma de seguridad el gruista deberá permanecer en la cabina hasta que la línea sea puesta fuera de servicio, ya que en su interior no corre peligro de electrocución. No obstante, si se viese absolutamente obligado a abandonar la grúa, deberá hacerlo saltando con los pies juntos, y lo más alejado posible de la máquina, para evitar el contacto simultáneo entre ésta y tierra.
- En días de viento intenso debe trabajarse con la cabina cerrada y suficientemente ventilada, con objeto de evitar efectos sobre los ojos por desprendimiento de partículas adheridas a las cargas. Si es necesario deberán utilizarse los equipos de protección ocular.
- Si el nivel sonoro en la cabina de mando pudiese alcanzar niveles peligrosos para la salud deberá insonorizarse la cabina. En caso contrario el gruista utilizará las protecciones auditivas adecuadas (cascos, tapones, etc.).
- En condiciones climatológicas adversas por frío o lluvia, se utilizará ropa de trabajo apropiada. Así mismo se asegura una ventilación suficiente de la cabina en las épocas del año con calor excesivo.
- Con objeto de evitar fatigas, se ajustará la organización del trabajo y se establecerán pausas.
- Al bajar de la grúa deberá asegurarse que los mandos están en punto muerto y que se encuentra inmovilizada.

- **Medidas a tomar al finalizar la tarea**

Una vez finalizado el trabajo y antes de abandonar la grúa, se tendrán en cuenta las siguientes actuaciones:

- La grúa se parará en terreno llano con los elementos de extensión en la posición mínima de carrera y de acuerdo a las indicaciones recogidas en el manual del fabricante.
- Se parará el motor, se quitará la llave de contacto y se colocarán todos los mandos en punto muerto.
- Preferentemente, debe establecerse una zona delimitada para su estacionamiento. Si se usan los estabilizadores estos deben mantener la máquina nivelada y se comprobará la firmeza de los apoyos en el suelo.
- Se colocará el freno de parada, se calzará la máquina y se desconectará la batería.
- Se cerrará la puerta de la cabina y el compartimento del motor.
- De la máquina se bajará utilizando las empuñaduras y los escalones diseñados para este fin y siempre se cara a la máquina.
- El suelo donde se estacione la grúa deberá ser firme y seco. Nunca debe estacionarse la grúa en terreno con barro o con agua, especialmente en invierno, dado que, las heladas, pueden dañar los neumáticos.
- Deben quedar establecidos de forma constatable, tanto la persona responsable, como el procedimiento para la custodia de las llaves de la grúa.

2.7. Cuartos de carga de baterías

Una parte importante de las carretillas elevadoras emplean como fuente de energía baterías de acumuladores eléctricos de plomo-ácido sulfúrico que almacenan energía química durante la operación de carga y la devuelven en forma de energía eléctrica para su aprovechamiento en las operaciones que se realizan con estos equipos. Como después de un determinado tiempo de uso agotan su carga y requieren una recarga. Esta operación, que se repite de manera sistemática en los almacenes donde se utilizan carretillas elevadas se debe realizar en condiciones de seguridad.



- **Riesgos en operaciones con baterías**

Los principales riesgos a los que pueden estar los operadores de carretillas que realizan operaciones de carga de las baterías son:

- Contacto y proyección de ácido sulfúrico fuertemente corrosivo, siendo de mayor gravedad en el caso de explosión con rotura del recipiente de la batería.
- Contacto eléctrico en la utilización de los equipos de carga.
- Explosión ocasionada por el desprendimiento de hidrógeno durante el proceso de carga de baterías.
- Atrapamiento/aplastamiento por caída de objetos, baterías en las operaciones de retirada y reposición
- Sobreesfuerzos en operaciones de manipulación manual y mecánica.
- Caídas al mismo nivel por tropiezos con cables u objetos en lugares de paso.
- Riesgos higiénicos por inhalación de aerosoles de ácido sulfúrico.

La importancia de estos riesgos y las medidas preventivas a adoptar por lo trabajadores deberán estar recogidas en las correspondientes evaluaciones de riesgos del puesto de trabajo del carretillero.

- **Cuarto de baterías**

Dependiendo del tipo y número de carretillas presentes en cada instalación nos podemos encontrar con dos situaciones:

- Zonas más o menos apartadas del propio almacén donde se dispone de los equipos de carga. Esta situación se da cuando el número de carretillas es limitado.
- Cuartos específicos para la carga de baterías que se presentan cuando se dispone de un número importante de carretillas, y es el local en el que se cargan baterías en grandes series, generalmente fuera de los equipos y vehículos que las utilizan. Las instalaciones para carga de baterías deben estar situadas en zonas diseñadas para ese objetivo.

- **Riesgo de explosión**

En este apartado nos centraremos en el riesgo de explosión por el desprendimiento de hidrogeno durante las operaciones de carga y los criterios generales para el diseño de las zonas de carga y de los cuartos de baterías.



- Desprendimiento de hidrógeno:

El hidrógeno es un gas extremadamente inflamable y si se encuentra en las concentraciones del rango de inflamabilidad o explosividad en un recinto cerrado, existe el riesgo de explosión ante la presencia de cualquier foco de ignición. El desprendimiento de hidrógeno y oxígeno tiene lugar en la reacción de electrolisis del agua durante la fase final de carga y especialmente si ocurre sobrecarga. Este desprendimiento de hidrogeno es débil con la batería en reposo o en descarga, pero alcanza su valor máximo al final de la carga y especialmente si se somete a una sobrecarga. La generación de esos gases continúa durante aproximadamente una hora después de desconectar la corriente de carga.

- Medias preventivas:

En las zonas de carga y cuartos de baterías se debe evitar una concentración que alcance el límite inferior de explosividad del hidrógeno (4% en volumen en aire). Antes de instalar o poner en marcha una batería que ha sido cargada, es recomendable dejarla como mínimo una hora y con los tapones retirados y ventilar cada celda con una corriente suave de aire.

1. Criterios Generales: Cuartos de Baterías

El local será construido de materiales incombustibles, cubierto con una techumbre ligera en previsión de explosiones y sin dependencias con ocupación de personas en el piso superior.

La puerta de acceso deberá abrir hacia fuera y estará normalmente cerrada.

El suelo será impermeable, resistente a los ácidos y tendrá una pendiente para la eliminación del agua de limpieza y de posibles derrames de ácido.

Las paredes estarán recubiertas de un enlucido estanco hasta una altura mínima de un metro desde el suelo.

El local no debe dedicarse a otros objetivos que los previstos. No deben almacenarse productos combustibles.

Se debe proceder a una limpieza frecuente del local y a una eliminación mediante aspiración del polvo de los vasos de la batería cuidando de no succionar electrolito.

La calefacción del local solamente se deberá hacer por fluido calefactor (aire, agua o vapor de agua) y la temperatura de la envoltura exterior de los conductos no debe exceder de 150 °C. La caldera de calefacción estará situada en un local exterior al de las baterías y si es contiguo,



estará separado por un muro cortafuegos de resistencia al fuego mínima RF 120.

Protección contra incendios

Un local destinado a carga de baterías, perteneciente a un establecimiento industrial debe cumplir el Real Decreto 786/2001, Reglamento de Seguridad contra incendios en los establecimientos industriales

Ventilación

La ventilación en un local de carga de baterías debe ser suficiente para evitar el sobrecalentamiento de las baterías, de los cargadores, para que la concentración de hidrógeno sea inferior al límite inferior de explosividad y para que la concentración de vapores de ácido sulfúrico sea inferior al valor límite ambiental de exposición diaria establecido (1 mg/m³).

Para evitar o disminuir esos riesgos, estos locales no se deberán ubicar en subterráneos.

A efecto de diseñar una ventilación mínima debería aplicarse un coeficiente de seguridad de 5, lo que equivaldría a que la concentración de hidrógeno no debería sobrepasar el 20% del límite inferior de explosividad (0,8%).

A título orientativo se puede estimar que la recarga de una batería de vehículo, de 60 Ah y 12V desprende: $0,21 \text{ L} / (\text{A} \times \text{h} \times \text{V}) \times 60 \text{ A} \times \text{h} \times 12 \text{ V} = 150 \text{ L}$ de hidrógeno. Esta operación no debería realizarse en un local cerrado de volumen menor a 100 veces ese volumen, 15 m³.

Así mismo, para el cálculo de la zona peligrosa que se puede originar en la operación de carga de baterías de plomo podemos considerar la norma técnica italiana CEI EN 50272-3 "*Prescripciones de seguridad para baterías y su instalación. Parte 3. Batería de tracción*". En ella se indica que "en áreas abiertas y en locales bien ventilados se puede suponer que cuando la velocidad del aire sea mayor o igual a 0,1 m/s se dispone de una adecuada ventilación", así mismo la norma indica que "en las inmediaciones de la batería la dilución no está asegurada siempre, en consecuencia, debemos definir una distancia mínima de 0,5 m en la cual no debe haber llama, chispas o dispositivos incandescentes a una temperatura máxima superficial de 300°C". Cuando exista la posibilidad de carga simultánea de más de una batería para el cálculo de la cantidad de aire de ventilación debemos tener en cuenta que la norma dice "...cuando la emisión de hidrogeno pueda venir de más de una batería situada en el mismo local, la ventilación necesaria debe ser calculada

como la suma de las necesidades de cada una de las baterías”, siempre considerando el momento de mayor producción de hidrógeno.

Instalación eléctrica

En el caso de que, en el “documento ATEX” se determine existencia de Riesgo de incendio y explosión en el cuarto de baterías se deberá cumplir con los requisitos de la ITC BT 29 “Instalaciones en locales con riesgo de incendio y explosión”.

3. Zona de pulpeado

Los trabajadores que se acerquen a la zona del púlper, además deben tener presentes los siguientes **riesgos**:

1. Caídas al interior del púlper.
 - A través de la zona superior del púlper.
 - Desde la cinta de alimentación.
2. Atrapamientos
 - Con elementos móviles de transmisión.
 - Con elementos móviles que intervienen en el trabajo.
3. Golpes
 - Con elementos móviles.
 - Por caída de objetos.

Para prevenir estos riesgos en la medida de lo posible, se tomarán las siguientes **medidas preventivas**.

1. **Para evitar caídas al interior del púlper** a través de la zona superior, el perímetro del púlper debe estar protegido. Se debe instalar un cierre perimetral que cubra lo máximo posible la zona superior del púlper. Altura mínima de 90 cm (según R.D. 2177/2004 y R.D. 486/1997), recomendada 110 cm (según norma UNE-EN ISO 14122).



Figura V.3.1: Púlper con protección en su perímetro



Figura V.3.2: Púlper con barandilla perimetral

Para reducir este riesgo, se montará una barandilla como la de la figura anterior, no obstante, hay que tener en cuenta una serie de riesgos residuales que inciden desfavorablemente en esta medida preventiva, como pueden ser los siguientes:

- Falta de orden y limpieza: una acumulación de materia prima en torno a los equipos puede llegar a reducir la altura mínima exigible (90 cm)
- Colocar pequeñas escaleras, taburetes y objetos en torno a los equipos, sobre los que se pueden subir los trabajadores.
- Existencia en torno a la protección perimetral de tuberías y escalones, rampas que reduzcan la altura de seguridad.
- Válvulas manuales de difícil acceso y colocadas en la vertical del púlper o próximas a su perímetro, que pueden implicar que los operarios para su accionamiento trepen por barandillas o cerramientos.
- Realización de trabajos sobre la vertical del púlper mientras se encuentre en funcionamiento.

Para evitar caídas desde la cinta de alimentación al púlper se deben instalar paradas de emergencia en las siguientes zonas:

- Zonas de alimentación de cintas transportadoras.
- Cable de emergencia a lo largo de zonas accesibles en cintas transportadoras.
- Cable de emergencia en pasarelas laterales de cintas transportadoras.
- Arco de parada de emergencia a la entrada de materia prima en el púlper.
- Boca de alimentación del púlper.

Estas paradas de emergencia deben ser fácilmente accionables y accesibles desde el lugar de operación.

La acumulación de pasta puede bloquear el dispositivo de emergencia y al ser pulsado no accionarse el paro, como vemos en la siguiente figura:



Figura V.3.3: seta de emergencia bloqueada por la acumulación de pasta.

Para evitar la acumulación de suciedad se colocará una envolvente protegiendo el dispositivo de seguridad, como vemos en la siguiente figura:



Figura V.3.4: Envolvente en torno al dispositivo de paro de emergencia.

A pesar de estas medidas, si un operario caído en la cinta está inconsciente no puede accionar estos dispositivos. Para este caso se usarán chalecos que incorporan un dispositivo de detección que activa el paro de la instalación al pasar por un arco ubicado antes del púlper.



Figura V.3.5: Arco de parada de emergencia en la cinta transportadora

2. Para evitar atrapamientos con elementos móviles de la transmisión se instalarán los resguardos fijos adecuados, como vemos en las siguientes figuras:



Figura V.3.6: Resguardo fijo en transmisión de correas. Se debe crear una envolvente en torno a la zona peligrosa, de forma que sea inaccesible

Igualmente, con los elementos móviles que intervienen en el trabajo se instalarán una serie de resguardos fijos:



Figura V.3.7: Ejemplo de resguardo tipo rejilla que debe instalarse en estas zonas



Figura V.3.8: Protección, hasta 2,5 m de altura, de zonas accesibles en cintas transportadoras (lateral e inferior)

3. Protección contra golpes por elementos móviles:

La rotura de correas de transmisión ocasiona el riesgo de proyección de la misma, pudiendo alcanzar a personas. Aunque se encuentren en zonas inaccesibles o a altura elevada es conveniente protegerlas de igual forma que cuando existe riesgo de atrapamiento con elementos de transmisión.



Figura V.3.9: Los resguardos instalados en este ejemplo retienen la correa en el caso que se produzca la rotura

En cuanto a los golpes por caídas de objetos, en algunos casos la poca estabilidad de la materia prima, en forma de balas o bobinas, que es transportada hasta los púlpers mediante cintas transportadoras puede generar peligro de caída de objetos, y alcanzar a trabajadores que se encuentran en el entorno. Para evitar el peligro de vuelco de la carga transportada, deben instalarse protecciones laterales en las cintas que la retengan en caso de vuelco. Debe quedar abierta la zona imprescindible para alimentar la cinta y realizar la operación de corte de flejes y alambres.

Por último, para la limpieza del púlper, los operarios que estén en contacto con materiales del proceso deben usar guantes PVC, así como los que procedan a retirar alambres y sunchos deben de llevar guantes de descarnado ante el riesgo de cortes o pinchaduras.

En la tabla V.3.1 se verá, a modo de resumen, los equipos de protección tanto individual como colectiva que se deben aplicar a los trabajadores de la zona de pulpeado y desintegración.



Tabla V.3.1: Equipos de protección individual y colectiva

Equipos de Protección Personal	Protección Colectiva
Zapatos antideslizantes	Señalizaciones de Seguridad
Chaleco Reflectivo (para turnos de la noche)	Botiquín
Guantes gruesos de cuero	Extintores
Lentes de seguridad	Alarmas contra incendios
Protección Auditiva	
Casco	
Tapones auditivos	

4. Plan de emergencias

El objetivo fundamental de este Plan, es asegurar la integridad física de los ocupantes de la instalación ante una situación de emergencia, así como salvaguardar sus bienes y propiedades

4.1. Definiciones

Evacuación: Procedimiento obligatorio, ordenado, responsable, rápido y dirigido de desplazamiento masivo de los ocupantes de un recinto hacia la zona de seguridad de éste, frente a una emergencia real o simulada.

Emergencia: Situación que pone en riesgo inminente la integridad física y psicológica de los ocupantes de un recinto y que requiere de una capacidad de respuesta institucional organizada y oportuna a fin de reducir al máximo los potenciales daños.

Alerta: Es un estado declarado, indica mantenerse atento. Ejemplos para declarar Alerta "se maneja información de un incendio cercano que puede comprometer el recinto", "las fuertes precipitaciones han inundado zonas muy cercanas a nuestro recinto".



Alarma: Es una señal o aviso sobre algo que va a suceder en forma inminente o ya está ocurriendo. Por lo tanto, su activación significa ejecutar las instrucciones establecidas para una emergencia.

Plan Específico de Emergencias: Ordenamiento de disposiciones, acciones y elementos necesarios propios de cada recinto, en particular del INP, y de su respectivo entorno inmediato, articulados de manera tal de dar una respuesta eficaz frente a una emergencia.

Evacuación parcial: Está referida a la evacuación de una o más dependencias con peligro inminente de un recinto, pero no de todo el recinto comprometido por la emergencia.

Evacuación total: Está referida a la evacuación de todas las dependencias de un recinto.

Vías de evacuación: Son aquellas vías que estando siempre disponibles para permitir la evacuación (escaleras de emergencia o servicio, pasillos, patios interiores etc.) ofrecen una mayor seguridad frente al desplazamiento masivo y que conducen a la zona de seguridad de un recinto.

Zona de seguridad: Es aquel lugar físico de la infraestructura que posee una mayor capacidad de protección masiva frente a los riesgos derivados de una emergencia y que además ofrece las mejores posibilidades de abandono definitivo de un recinto.

Incendio: Es una reacción química exotérmica descontrolada producto de la combinación de tres componentes: material combustible (madera, papel, géneros, líquidos etc.), oxígeno (presente en la atmósfera) y una fuente de calor (usualmente provista por descuido humano), con desprendimiento de calor, humo, gases y luz.

Sismo: Consiste en el desplazamiento brusco y de intensidad relativa de zonas de la corteza terrestre, con un potencial destructivo variable.

Terremoto: Movimiento brusco de la Tierra, causado por la brusca liberación de energía acumulada durante un largo tiempo.



4.2. Generalidades

Aunque todo está preparado para el quehacer normal de nuestra Empresa, es necesario estar preparados para hacer frente a alguna situación anormal que puede afectar nuestra integridad física o nuestro patrimonio.

Las siguientes son, situaciones de emergencia de origen natural:

- Sismos
- Terremotos

Y las siguientes son, situaciones de emergencia de origen humano:

- Incendios
- Robo con asalto
- Otros

Las emergencias requieren ser asumidas de acuerdo con las fases del proceso administrativo que corresponde a:

- Planificación
- Organización
- Ejecución
- Evaluación.
-

La responsabilidad última debe recaer en la autoridad máxima de cada recinto de esta Empresa, el cual debe conocer a cabalidad los aspectos específicos del Plan de Emergencia, sin perjuicio de ello puede delegar la implementación y desarrollo de éste.

Para cada tipo de emergencia será necesario establecer las acciones antes (planificación y organización), las acciones durante (ejecución) y las acciones después (evaluación).

4.2.1. Consideraciones para la planificación

Para planificar frente a una emergencia será necesario considerar:

- Establecer algún sistema de alarma a través del cual se informe oportunamente a los ocupantes del recinto.
- Establecer los procedimientos esperados para todos los ocupantes y responsables ante la emergencia.



- Establecer las comunicaciones necesarias, con quienes corresponda, en prioridad y oportunidad.
- Establecer las situaciones que ameriten evacuación de los ocupantes del recinto.
- Establecer las vías de evacuación principales y alternativas según la ubicación de los ocupantes.
- Establecer con antelación las zonas de seguridad principales y alternativas frente a una evacuación.
- Conocer la ubicación y uso de: extintores, control del suministro de energía, gas, combustible, agua.
- Conocer procedimientos de comunicación internos y externos (bomberos, carabineros, hospital, otros).
- Conocer los niveles de responsabilidad.
- Realizar simulacros de emergencia con periodicidad y con la debida seriedad.
- Disponer de equipamiento para emergencias: extintor, linternas, botiquín.
- Propiciar hábitos favorables y evitar situaciones de riesgo.

4. Información básica del recinto:

- Características de construcción, antigüedad, planos.
- Número de pisos.
- Disposición de salas.
- Áreas de riesgo crítico.
- Vías de evacuación.
- Sistema de señalizaciones (incendio, evacuación, otros).
- Sistema eléctrico, de gas, combustible agua potable.
- Sistemas de alarma y de seguridad contra incendios.
- Diagnóstico de extintores (cantidad, ubicación, mantención).
- Existencia de botiquines y sus insumos.
- Información básica de las personas: Número de trabajadores.
- Horarios de trabajo.



- Capacitación en emergencias.
- Capacitación en protección contra incendios.
- Capacitación en primeros auxilios.
- Números o anexos telefónicos de los encargados.
- Teléfonos de emergencias (bomberos, carabineros, hospitales etc).

4.2.2. Consideraciones para la organización

- Preparación ante emergencias, capacitando en materias relativas a emergencias y métodos de extinción de incendios, tales como, uso y manejo de extintores.
- Organizar la atención eventual de urgencias, desde el punto de vista del otorgamiento de primeros auxilios y coordinación con entidades sanitarias.

4.2.3. Consideraciones para la ejecución

- Los procedimientos de evacuación reales y simulados deben ser obligatorios para todas las personas del recinto.
- Los simulacros de evacuación deben llevarse a cabo en cualquier momento y no en horas prefijadas.
- Los procedimientos de evacuación simulada deben ser regulares, a fin de incorporar eficazmente los hábitos deseados (cada semestre).

4.2.4. Consideraciones para la evaluación

- Para la evaluación de la puesta en práctica del Plan de Emergencia hay que considerar el tiempo total de evacuación.
- Evaluar de manera participativa, con todos los involucrados, la puesta en práctica del plan, a fin de obtener la mayor cantidad de información posible.



- Evaluar el comportamiento de los distintos niveles de responsabilidad, así como el de todos los funcionarios.
- Identificar todos los problemas y fallas observadas, en cuando al cumplimiento de los procedimientos señalados, establecer posibles causas y soluciones.
- Evaluar principalmente: uso y operación de extintores, procedimiento de alarma y comunicaciones, estado y funcionamiento de las vías de evacuación.



CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

A lo largo de este proyecto hay que tener en cuenta un aspecto que a la hora de concebir un diseño para un puesto de trabajo en el sector industrial actual, no sólo se debe basar éste en un modelo de máxima productividad, sino que se tienen en cuenta numerosos otros factores de igual o mayor importancia.

Conforme ha ido evolucionando la industria a lo largo de los años se ha ido desarrollando un fuerte interés por esos otros factores de importancia, como pueden ser la higiene, la ergonomía y la seguridad, que además reportan a su vez sus propios beneficios económicos para la empresa.

Las conclusiones obtenidas a raíz de la realización de este TFG en la escuela de Ingenierías Industriales Valladolid han sido plenamente satisfactorias, respondiendo a los objetivos marcados al inicio del mismo y son las siguientes:

- Beneficio económico por ahorro de mano de obra debido al cambio tecnológico por la implantación de un púlper de tecnología actual en el proceso de fabricación a partir de fibras recicladas.
- Ahorro de energía eléctrica al tratarse de un púlper de nueva generación.
- Se ha visto que la rentabilidad de la inversión es de una tasa de rentabilidad (TIR) de un 79 % con un periodo de retorno de la inversión (Pay Back) de 1 año y 4 meses. A la vista de los datos se considera una inversión muy rentable.

La realización del proyecto ha permitido poner en práctica y desarrollar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera del Grado en Ingeniería Química, especialmente en Ingeniería Fluidomecánica, Ingeniería de Fluidos, Resistencia de Materiales, Diseño de Máquinas y Ciencia de Materiales.

Se ha desarrollado una amplia bibliografía relativa al campo del papel particularizando en el papel reciclado recuperado.

Se ha ahondado en el conocimiento teórico de los equipos involucrados.

1. Trabajos futuros

En el presente trabajo, a pesar de haber abordado el modo de producción de papel desde un punto de vista general, tan solo se ha desarrollado el diseño

de una de las partes de la máquina de papel, el púlper para la desintegración de papelote.

Por lo tanto, este trabajo puede tomarse como punto de partida para nuevos trabajos que darán una mayor consistencia a los modos de producir papel a partir de papel reciclado actuales.

Entre los posibles trabajos futuros se proponen los siguientes:

- Caracterización del refinado y cálculo de un sistema de refinación y sus instalaciones complementarias en una fábrica de papel.
- Diseño de un sistema de destintado eficaz para su implantación en una fábrica de papel.
- Cálculo y diseño de una máquina de papel: sección de prensas, sección de secado, estucado, calandrado y bobinado.
- Blanqueo en una planta piloto a nivel de laboratorio de pulpas mecánicas, químicas y semiquímicas.



CAPÍTULO VII BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

Bibliografía

- Agulló, N. S. (2014). *Planta de trigeneración para industria papelera*.
- Ajersch, M., & Pelton, R. (1996). *Mechanisms of pulp loss in flotation deinking*.
- ASPAPEL. (2006). *Guía para el control de calidad del papel recuperado*.
- ASPAPEL. (2006). *Manual para la mejora de la seguridad de la maquinaria papelera*.
- ASPAPEL. (2007). *Diagnóstico de la generación y gestión de residuos sólidos en la industria papelera española*.
- ASPAPEL. (2008). *Guía de gestión de residuos (fábricas de pasta, papel y cartón)*.
- ASPAPEL. (2011). *Memoria de sostenibilidad - Sector papel*.
- ASPAPEL. (2014). *Actualización 2014: Memoria de sostenibilidad - Sector papel*.
- Avilés, R. (2005). *Análisis de fatiga en Máquinas*.
- Bennington, C., Smith, J., & Sui, O. (1998). *Characterization of repulper operation for newsprint deinking*.
- Bennington, C., Smith, J., & Sui, O. (1998). *The effect of mechanical action on waste paper defibering and ink removal in repulping operations*.
- Cáceres, H., & Briceño, C. (1988). *Producción de pulpas a partir de papeles de desecho impresos con tonos fuertes, destintados por flotación*.
- Campos, E. d. (2009). *Curso de preparación de la pasta*.
- Carreño, R. M. (2009). *Caracterización y eliminación de la materia disuelta y coloidal en la fabricación de papel reciclado*.
- Casals. (1994). *Merms y desperdicios de papel en rotativas*. Barcelona: R. Editorial Tecnoteca.
- Casey, J. P. (1991). *Pulpa y Papel. Química y Tecnología Química* (Vols. 1,2 y 3).
- Castrillón, R. C., & Perea Sandoval, A. (1993). *Diseño preliminar de una planta piloto para la producción de papel a partir de papel de desecho*.

- Comisión conjunta de libros de texto de la industria del papel (2012). *Reciclado celulósico. (Vols. 1 y 2).*
- Demers, P., & Kay Teschke. (s.f.). *Enciclopedia de salud y seguridad en el Trabajo. Industria de papel y de la pasta de papel.*
- Escobedo, M. P. (2015). *Depuración de aguas residuales de una industria de papel reciclado mediante lagunaje.*
- Fabry, B. (2010). *A review of drum pulping parameters and their influences on deinking.*
- Faires, V. (1999). *Diseño de elementos de máquinas.*
- FAO, O. (s.f.). *Anuarios de Madera y Productos de Madera.*
- García, M. J. (2016). *Potencial de producción de biochar en España a partir de residuos de la industria papelera, de lodos de EDAR, de residuos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: Estudio de la fijación de carbono.*
- Gere James, M. (2002). *Timoshenko: Resistencia de materiales.*
- Greenpace. (2004). *Guías para un consumo responsable de productos forestales. El papel, como reducir el consumo y optimizar el uso y reciclaje de papel.*
- Greenpeace. (2006). *El futuro de la producción de celulosa y las técnicas de producción más favorables para el medio ambiente.*
- Haroldo, V. P. (2004). *Diseño de una planta para la producción de papel artesanal a partir de papel de desecho.*
- INERCO. (2016). *Proyecto básico nueva línea de fabricación de cartón en la fábrica de international papel en fuenlabrada (Madrid).*
- International, C. (s.f.). *Equipos de preparación de pastas.*
- Johana, M. R., & Nube Margarita, C. (2012). *Estudio de factibilidad para una planta procesadora de papel y cartón reciclado en la ciudad de Azogues.*
- Medina, M. E., & Leon Nieto, C. (2012). *Diseño de un proceso para la fabricación de papel reciclado ecológico a escala de laboratorio usando peróxido de hidrógeno.*
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas. Pearson - Prentice Hall.*
- Perez, D. C. (2008). *Instalación eléctrica de una industria papelera.*

- Programa sectorial de prevención de riesgos laborales (s.f.). *Manual de seguridad en el manejo y almacenamiento de materias primas y producto acabado en la industria papelera.*
- Red Iberoamericana de docencia e investigación en celulosa y papel (2008). *Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica .*
- Real casa de la moneda. *Fábrica Nacional de Moneda y Timbre (2016). Contratación del servicio de asistencia técnica eléctrica para el taller de mantenimiento de la fábrica de papel de burgos.*
- Rodrigo, R. M. (2016). *Diseño de un sistema de reutilización de agua mediante osmosis inversa en una industria papelera en el municipio de Almazán (Soria).*
- Santiago, S. A. (2015). *Diseño del reactor de ozonización y nave de almacenamiento para mejorar la calidad de agua a verter al río Duero en una industria papelera de la localidad de Almazán (Soria).*
- SCA. (s.f.). *Fabricación de papel.*
- Shigley, J., & Mischke, C. (2002). *Diseño en ingeniería mecánica.*
- Turner, S. (1991). *Appendices. A Short History of Papermaking.* New York.
- Universidad del Atlántico. *Universidad Autónoma de Occidente. Asesor (s.f). Ahorro de energía en la industria papelera.*
- White, G. (2008). *Mecánica de fluidos.*
- Zapico, J. F. (1999). *El papel y otros soportes de impresión.*

1. Webgrafía

- <https://es.slideshare.net/NelsonIzaguirre1/preparacin-de-pasta-pulper-funcionamiento>
- <https://laprestampa.wordpress.com/2014/10/14/fabricacion-del-papel/>
- <http://aspapel.es/ipe>
- <http://www.inia.es/IniaPortal/verPresentacion.action>
- http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/25606/mod_resource/content/1/Fabricacion%20de%20Papel%20TORRASPAPEL.pdf
- <http://www.papermarket.cl/>
- <http://www.uchile.cl/cultura/grabadosvirtuales/apuntes/papel.html>
- <http://www.monografias.com/trabajos46/hemicelulosas-maderas/hemicelulosas-maderas2.shtml>
- <http://www.cismadeira.com/especies/downloads/pastapapel.pdf>
- <http://trigomariosario.com.ar/productos/correas-poly-v/>
- <http://venturasa.blogspot.com.es/2013/07/la-vida-util-del-rodamiento.html>
- <http://www.nskamericas.com/products-12.htm>
- <https://www.slideshare.net/nicanorterrero1/rodamientos-tipos-de-rodamientos-clasificacion-de-rodamientos-19449599>
- <https://www.textoscientificos.com/papel/pulpa/comparativa>
- <http://www.temporamagazine.com/tinta-sobre-piel-la-elaboracion-del-pergamino-en-la-edad-media/>
- http://historiaybiografias.com/el_papel/
- <https://www.youtube.com/watch?v=FkUrV9-zuWo>
- http://www.linde-gas.com.ar/es/processes/cleaning_polishing_grinding/bleaching/oxygen_delignification/index.html
- <http://www.bollorethinpapers.com/es/conocimiento-y-formacion/glosario>
- <http://cutes-vacuum-pump.com/vacio/papel/fabricaciondelpapel/index.html>
- http://www.irmasol.com/espanol_calidades.htm



CAPÍTULO VIII

ANEXOS



ÍNDICE

Anexo I: Clasificación de los procesos de producción de pulpa de madera	397
Anexo II: Calidades normalizadas de papel y cartón recuperado	401

Anexo I: Clasificación de los procesos de producción de pulpa de madera

Tabla A I.1: Resumen de los procesos de producción de pulpa

Forma de la madera	Nombre común	Tratamiento químico	Tratamiento mecánico	Rendimiento en pulpa (%)
Mecánico				
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
Quimicomecánica y quimicotermodomecánica				
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

Forma de la madera	Nombre común	Tratamiento químico	Tratamiento mecánico	Rendimiento en pulpa (%)
Tarugos	Madera molida químicamente	Sulfito neutro	Piedra de moler	80-90
Astillas	Sosa fría	Sosa cáustica	Refinador de disco	80-90
Astillas	Sulfito alcalino	Sulfito alcalino	Refinador de disco	80-90
Astillas	Quimicotermomecánica	Vapor + productos químicos	Refinador de disco (presión)	65-85
Semiquímica				
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	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$	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	Refinador de disco	65-85
Astillas	Sin azufre	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$	Refinador de disco	65-85
Químico de alto rendimiento				
Astillas	Kraft (sulfato)	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$	Refinador de disco	55-65

Forma de la madera	Nombre común	Tratamiento químico	Tratamiento mecánico	Rendimiento en pulpa (%)
Astillas	Sulfito	Sulfito ácido (Ca, Na, Mg)	Refinador de disco	55-70
Astillas	Sulfito	Bisulfito (Na, Mg)	Refinador de disco	55-70
Totalmente químico				
Astillas	Kraft (sulfato)	$\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{CO}_3$	Suave o ninguno	40-55
Astillas	Polisulfuro (una etapa)	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$	Suave o ninguno	45–60
Astillas	Polisulfuro (dos etapa)	Pretratamiento H_2S ; kraft	Suave o ninguno	45-60
Astillas	Sosa	Sosa cáustica	Suave o ninguno	40-55
Astillas	Sosa-AQ	$\text{NaOH} +$ 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_3)	Suave o ninguno	45-55
Astillas	Bisulfito	Bisulfito (Na, Mg, NH_3)	Suave o ninguno	45-60
Astillas	Magnefita	Bisulfito de magnesio	Suave o ninguno	45-60

Forma de la madera	Nombre común	Tratamiento químico	Tratamiento mecánico	Rendimiento en pulpa (%)
Astillas	Sulfito neutro	Sulfito neutro	-	45-55
Astillas	Sulfito, multietapas			
Astillas	Stora	Sulfito-bisulfito; SO ₂	Ninguno	45-55
Astillas	Sivola	Sulfito; sulfito alcalino	Ninguno	45-55
<i>Pulpa para disolver</i>				
Astillas	Prehidrólisis kraft	Prehidrólisis kraft	Ninguno	35
Astillas	Sulfito	Sulfito ácido (Ca, Na)	Ninguno	35



Anexo II: Calidades normalizadas de papel y cartón recuperado

Tabla A II.1: Resumen de los procesos de producción de pulpa

GRUPO 1.- CALIDADES ORDINARIAS			
LISTA EUROPEA según CEPI y BIR	LISTA EUROPEA según UNE-EN 643	DENOMINACIÓN COMERCIAL	DESCRIPCIÓN (Según lista europea CEPI-BIR)
1.01	A-1	Papelote Selectiva	MEZCLA SIN CLASIFICAR. <i>Mezcla de papel y cartón sin clasificar, pero sin materias inutilizables.</i> Mezcla de varios tipos de papel y cartón sin límite en el contenido de fibra corta.
1.02	A-2	Mezcla 30% Cartón	MEZCLA. <i>Mezcla de papel y cartón (clasificado).</i> Mezcla de varias calidades de papel y cartón con un máximo de 40% de periódicos y revistas.
1.03	A-3	Cartoncillo Gris	CARTONCILLO GRIS. <i>Cartoncillo Gris.</i> Cartoncillo gris o mezcla de cartoncillos, con o sin impresión, con o sin tapa blanca, exento de cartón ondulado.
1.04	A-4	Cartón Paja 70%	CARTÓN PAJA. <i>Papel y cartón ondulado de supermercado.</i> Embalajes usados de papel y cartón, conteniendo un mínimo de 70% de cartón ondulado, siendo el resto cartón compacto y envoltorios de papel.
1.05	A-5	Cartón Paja 100%	CARTÓN PAJA 100%. <i>Cajas usadas de cartón ondulado.</i> Cajas usadas y planchas de cartón ondulado de diversas calidades.
1.06	A-7	Revistas Nuevas	REVISTAS NUEVAS. <i>Revistas nuevas.</i> Revistas nuevas, con o sin cola.
1.06.01	A-8	Revistas Nuevas sin cola	REVISTAS NUEVAS SIN COLA. <i>Revistas nuevas sin cola.</i> Revistas nuevas sin cola.
1.07	-	Guías Telefónicas	GUIAS TELEFÓNICAS. <i>Guías telefónicas.</i> Guías telefónicas nuevas o usadas, sin límite de contenido de páginas coloreadas en masa o sin cola. Se permiten tiras.
1.08	A-9	Periódico y Revista I	PERIÓDICOS Y REVISTAS I. <i>Mezcla de periódicos y revistas I.</i> Mezcla de periódicos y revistas, con un mínimo del 50% de periódicos, con o sin cola.
1.09	A-9	Periódico y Revista II	PERIÓDICOS Y REVISTAS II. <i>Mezcla de periódicos y revistas II.</i> Mezcla de periódicos y revistas, con un mínimo del 60% de periódicos, con o sin cola.
1.10	A-9	Periódico y Revista III	PERIÓDICOS Y REVISTAS III. <i>Mezcla de periódicos y revistas III.</i> Mezcla de periódicos y revistas, con un mínimo del 50% de revistas, con o sin cola.
1.11	-	Selectiva Clasificada Destinable	SELECTIVA CLASIFICADA DESTINABLE. <i>Papel gráfico clasificado para destinar.</i> El papel gráfico clasificado procedente de recogida doméstica; periódicos y revistas, cada uno con un mínimo del 40%. El porcentaje de papel y cartón no destinable debería ser reducido en el futuro a un nivel máximo del 1,5%. El porcentaje actual debe ser negociado entre comprador y vendedor.



GRUPO 2.- CALIDADES MEDIAS			
LISTA EUROPEA según CEPI y BIR	LISTA EUROPEA según UNE-EN 643	DENOMINACIÓN COMERCIAL	DESCRIPCIÓN (Según lista europea CEPI-BIR)
2.01	B-1	Periódico Leído	PERIÓDICO LEÍDO. <i>Periódicos.</i> Periódicos, con un máximo del 5% de periódicos o suplementos coloreados en masa.
2.02	B-2	Periódico Nuevo	PERIÓDICO NUEVO. <i>Periódicos invendidos.</i> Periódicos invendidos sin suplemento ni material coloreado en masa.
2.02.01	-	Periódico nuevo sin tinta flexográfica	PERIÓDICO NUEVO SIN IMPRESIÓN FLEXOGRÁFICA. <i>Periódicos invendidos sin impresión flexográfica.</i> Periódicos invendidos. Sin suplementos ni material coloreado en masa. No se permite material con impresión flexográfica.
2.03	B-5	Blanco 3ª poca impresión	BLANCO 3ª, POCA IMPRESIÓN. <i>Recorte blanco ligeramente impreso.</i> Recorte blanco ligeramente impreso, principalmente papel de pasta mecánica.
2.03.01	B-6	Blanco 3ª poca impresión, sin cola	BLANCO 3ª, POCA IMPRESIÓN, SIN COLA. <i>Recorte blanco ligeramente impreso sin cola.</i> Recorte blanco ligeramente impreso, principalmente papel de pasta mecánica, sin cola.
2.04	-	Blanco 3ª mucha impresión	BLANCO 3ª, MUCHA IMPRESIÓN REVISTAS NUEVAS. <i>Recorte blanco con mucha impresión.</i> Recorte blanco fuertemente impreso, principalmente papel de pasta mecánica.
2.04.01	-	Blanco 3ª mucha impresión, sin cola	BLANCO 3ª, MUCHA IMPRESIÓN, SIN COLA. <i>Recorte blanco con mucha impresión, sin cola.</i> Recorte blanco fuertemente impreso, principalmente papel de pasta mecánica, sin cola.
2.05	-	Papelote de Oficina	MEZCLA DE OFICINA. <i>Papel de oficina clasificado.</i> Papel de oficina clasificado.
2.06	B-7	Archivo Color	ARCHIVO COLOR. <i>Impresos de color.</i> Mezcla de papeles de impresión y escritura coloreados en masa, con o sin impresión. Sin papel carbón y sin cubiertas duras.
2.07	B-8	Libros	LIBROS. <i>Libros blancos sin pasta mecánica.</i> Libros, incluidas partidas defectuosas, sin tapas duras, principalmente de papel blanco sin pasta mecánica, impreso únicamente en negro, con un máximo del 10% de papel estucado.
2.08	B-10	Blanco Impreso (Monitor)	BLANCO IMPRESO, MONITOR. <i>Revistas coloreadas sin pasta mecánica.</i> Revistas estucadas o no, blancas o coloreadas en masa, sin tapas duras, lomos, tintas no dispersables y adhesivos, papel de carteles, etiquetas o recorte de etiquetas. Puede incluir circulares fuertemente impresas y recortes coloreados en masa. Con un máximo del 10% de papel de pasta mecánica.
2.09	B-12	Autocopiativo Blanco	AUTOCOPIATIVO BLANCO. <i>Papel autocopiativo.</i> Papel copiativo sin papel de calco.
2.10	B-13	Kraft Plastificado Blanco	KRAFT BLANCO PLASTIFICADO. <i>Cartoncillo blanqueado, plastificado, sin pasta mecánica.</i> Cartoncillo blanqueado, plastificado, sin pasta mecánica, procedente de fabricantes y transformadores.
2.11	B-13	Kraft Plastificado	KRAFT PLASTIFICADO. <i>Otros cartoncillos plastificados.</i> Otros cartoncillos plastificados pudiendo contener cartoncillos sin blanquear y papeles procedentes de fabricantes y transformadores.
2.12	B-14	Archivo Continuo Pasta Mecánica	ARCHIVO CONTÍNUO CON PASTA MECÁNICA. <i>Archivo continuo con pasta mecánica.</i> Archivo continuo con pasta mecánica, clasificado por colores, pudiendo contener fibra reciclada.



GRUPO 3.- CALIDADES ALTAS			
LISTA EUROPEA según CEPI y BIR	LISTA EUROPEA según UNE-EN 643	DENOMINACIÓN COMERCIAL	DESCRIPCIÓN (Según lista europea CEPI-BIR)
3.01	C-1	Blanco 2º con Cola (máx. 50% de mecánica)	BLANCO 2º CON MECÁNICA. Mezcla de recortes de impresión y escritura ligeramente coloreado. Mezcla de recorte de papel de impresión y escritura ligeramente coloreado en masa, con un mínimo del 50% de papel sin pasta mecánica.
3.02	C-2	Blanco 2º con Cola (máx. 10% de mecánica)	BLANCO 2º SIN PASTA MECÁNICA. Mezcla de recortes de impresión y escritura sin pasta mecánica, ligeramente coloreado. Mezcla de recorte de papel de impresión y escritura ligeramente coloreado en masa, con un mínimo del 90% de papel sin pasta mecánica.
3.03	-	Blanco 2º con Cola sin pasta mecánica	BLANCO 2º CON COLA SIN PASTA MECÁNICA. Recorte sin pasta mecánica. Recorte blanco con cola, sin pasta mecánica, ligeramente impreso, sin papeles coloreados en masa. Puede contener un máximo del 10% de papel con pasta mecánica.
3.04	-	Blanco 2º sin Cola sin pasta mecánica	BLANCO 2º SIN COLA SIN PASTA MECÁNICA. Recorte blanco. Recorte blanco con cola, sin pasta mecánica, ligeramente impreso, sin papel resistente a la humedad, ni papel coloreado en masa.
3.05	C-7	Archivo Blanco	ARCHIVO BLANCO. Archivo blanco sin pasta mecánica. Archivo blanco clasificado, procedente de archivos de oficinas, sin libros de contabilidad, ni papel carbón, ni adhesivos no solubles en agua.
3.06	-	Archivo Blanco	ARCHIVO BLANCO. Impresos blancos de oficina. Impresos blancos de oficina sin pasta mecánica.
3.07	C-8	Archivo Continuo	ARCHIVO CONTINUO. Archivo continuo blanco sin pasta mecánica. Archivo continuo blanco sin pasta mecánica, sin papel autocopiativo, ni cola.
3.08	C-10	Kraft Blanco, impreso	KRAFT BLANCO IMPRESO. Cartoncillo blanqueado al sulfato impreso. Recortes de cartoncillo blanqueado al sulfato con mucha impresión, sin cola ni materiales plastificados ni encerados.
3.09	C-10	Kraft Blanco, poca impresión	KRAFT BLANCO Poca impresión. Cartoncillo blanqueado al sulfato ligeramente impreso. Recortes ligeramente impresos de cartoncillo blanqueado al sulfato, sin cola ni materiales plastificados ni encerados.
3.10	-	Sin denominación	SIN DENOMINACIÓN. Multi impreso. Recorte sin pasta mecánica, estucado, ligeramente impreso, sin papel resistente a la humedad, ni papel coloreado en masa.
3.11	C-10	Cartoncillo Sueco, impreso	CARTONCILLO SUECO IMPRESO. Cartoncillo blanco multicapa, con mucha impresión. Recorte nuevo de cartoncillo blanco multicapa, con mucha impresión, con capas sin pasta mecánica o capas con pasta mecánica o termo-mecánica, pero no grises.
3.13	C-11	Cartoncillo Sueco, sin impresión	CARTONCILLO SUECO SIN IMPRESIÓN. Cartoncillo blanco multicapa sin impresión. Recorte nuevo de cartoncillo blanco multicapa, sin impresión, conteniendo capas sin pasta mecánica o capas con pasta mecánica o termo-mecánica, pero no grises.
3.14	C-12	Posteta de Periódico	POSTETA PERIÓDICO. Papel prensa blanco. Recorte y hojas de papel prensa blanco, sin impresión, sin papel de revista.
3.15	C-13	Posteta Mezcla	POSTETA MEZCLA. Papel blanco con pasta mecánica, estucado y sin estucar. Recorte y hojas de papel blanco sin impresión, con pasta mecánica, estucado y sin estucar.
3.15.01	C-13	Posteta Revista	POSTETA REVISTA. Papel blanco con pasta mecánica, conteniendo papel estucado. Recorte y hojas de papel blanco sin impresión, estucado, con pasta mecánica.
3.16	C-15	Blanco 1º Estucado	BLANCO 1º ESTUCADO. Papel estucado blanco sin pasta mecánica, sin cola. Recorte y hojas de papel estucado blanco sin pasta mecánica, sin cola.
3.17	C-17	Blanco 1º Bis	BLANCO 1º BIS. Recorte blanco. Recorte y hojas de papel blanco sin impresión, sin papel prensa o de revista, conteniendo un mínimo del 60% del papel sin pasta mecánica y un máximo del 10% del papel estucado, sin cola.
3.18	C-18	Blanco 1º	BLANCO 1º. Recorte blanco sin pasta mecánica. Recorte y hojas de papel blanco no impreso, pudiendo contener un 5% de papel estucado, sin cola.
3.18.01	C-19	Blanco 1º de Sobres	BLANCO 1º SOBRES. Recorte blanco sin pasta mecánica ni estucado. Recorte y hojas de papel blanco no impreso, sin papel estucado ni cola.
3.19	-	Kraft Blanco sin Impresión	KRAFT BLANCO SIN IMPRESIÓN. Cartoncillo blanqueado al sulfato sin impresión. Hojas no impresas de cartoncillo blanqueado al sulfato, sin cola ni materiales plastificados o encerados.

GRUPO 4.- CALIDADES KRAFT			
LISTA EUROPEA según CEPI y BIR	LISTA EUROPEA según UNE-EN 643	DENOMINACIÓN COMERCIAL	DESCRIPCIÓN (Según lista europea CEPI-BIR)
4.01	A-6	Recorte Ondulado Nuevo	RECORTE DE CANTONERAS. <i>Recorte nuevo de cartón ondulado. Recorte nuevo de cartón ondulado, con kraftliners o testliners.</i>
4.01.01	A-6	Recorte Ondulado Nuevo Kraft	RECORTE NUEVO DE KRAFT ONDULADO. <i>Cartón Kraft no usado. Nuevas cajas o recortes de cartón ondulado, solo con kraftliners, y la tripa de pasta química o termo-química.</i>
4.01.02	A-6	Recorte Ondulado Nuevo	RECORTE DE CANTONERAS. <i>Cartón ondulado nuevo. Cajas nuevas y recorte de cartón ondulado, con kraftliners o testliners.</i>
4.02	D-2	Cartón Kraft	CARTÓN KRAFT. <i>Kraft ondulado I. Cajas usadas de cartón ondulado, únicamente con kraftliners y la tripa de pasta mecánica o termo-química.</i>
4.03	D-1	Semikraft	CARTÓN SEMIKRAFT. <i>Kraft ondulado II. Cajas usadas de cartón ondulado, con kraftliners o testliners, pero teniendo al menos una cara de Kraft.</i>
4.04	D-3	Sacos Kraft Usados	SACOS USADOS. <i>Sacos kraft usados. Sacos kraft usados y limpios, resistentes o no a la humedad.</i>
4.04.01	-	Sacos Kraft Usados Capa Plastificada	SACOS USADOS PLASTIFICADOS. <i>Sacos usados con papeles plastificados. Sacos kraft usados y limpios, resistentes o no a la humedad pero pudiendo tener capas plastificadas.</i>
4.05	-	Sacos Nuevos	SACOS NUEVOS. <i>Sacos kraft nuevos con papeles plastificados. Sacos kraft nuevos, resistentes o no a la humedad.</i>
4.05.01	-	Sacos Nuevos Capa Plastificada	SACOS NUEVOS PLASTIFICADOS. <i>Sacos kraft nuevos. Sacos kraft nuevos, tanto resistentes o no a la humedad, pero pudiendo tener capas plastificadas.</i>
4.06	D-5	Kraft Liner Usado	KRAFT LINER USADO. <i>Kraft usado. Papel y cartón kraft usado con tonalidad blanca o natural.</i>
4.07	D-6	Kraft Liner Nuevo	KRAFT LINER NUEVO. <i>Kraft nuevo. Recortes y otros papeles y cartones kraft nuevos, de tonalidad natural.</i>
4.08	-	Kraft Carrier Nuevo	KRAFT CARRIER. <i>Kraft Carrier Nuevo. Kraft carrier nuevo, pudiendo contener papel resistente a la humedad.</i>

GRUPO 5.- CALIDADES ESPECIALES			
LISTA EUROPEA según CEPI y BIR	LISTA EUROPEA según UNE-EN 643	DENOMINACIÓN COMERCIAL	DESCRIPCIÓN (Según lista europea CEPI-BIR)
5.01	A-1	Recogida selectiva	RECOGIDA SELECTIVA SIN CLASIFICAR. <i>Mezcla de papel y cartón recuperado. Papel y cartón sin clasificar, con separación en origen.</i>
5.02	-	Mezcla de envases	MEZCLA DE ENVASES. <i>Envases mezclados. Mezcla de diversas calidades de papel y cartón de envases usados, sin periódicos ni revistas.</i>
5.03	-	Envases de bebidas (Bricks)	CARTONES PARA BEBIDAS. <i>Envases de cartón para líquidos. Envases de cartón para líquidos, usados, incluyendo capas de polietileno (con o sin aluminio), con un mínimo del 50% de fibra en peso, y siendo el resto aluminio o recubrimiento.</i>
5.04	-	Kraft tratado	KRAFT TRATADO. <i>Kraft para envoltorio. Papel kraft usado barnizado o laminado. No debe contener recubrimientos de alquitrán ni de cera.</i>
5.05	-	Etiquetas usadas	ETIQUETAS HÚMEDAS. <i>Etiquetas húmedas. Etiquetas húmedas usadas consistentes en papeles resistentes a la humedad, conteniendo un máximo de 1% de vidrio y de 50% de humedad, sin ninguna otra materia inutilizable.</i>
5.06	-	Blanco melaminado sin impresión	PAPEL BLANCO PARA CARTELES. <i>Papeles blancos sin impresión, sin pasta mecánica, resistentes a la humedad. Papeles blancos sin impresión, sin pasta mecánica, resistentes a la humedad.</i>
5.07	-	Blanco melaminado son impresión	CARTELES. <i>Papeles blancos impresos, sin pasta mecánica, resistentes a la humedad. Papeles blancos impresos, sin pasta mecánica, resistentes a la humedad.</i>



CAPÍTULO IX

PLANOS

