

IMPACTO AMBIENTAL COMPARATIVO DE LOS PROCESOS¹

Este artículo sigue al anterior, titulado "Las Mejores Tecnologías Disponibles o BAT". Ambos forman parte de la misma conferencia y su división en dos artículos obedece sólo al objetivo de facilitar su presentación y lectura.

CONSUMO ENERGÉTICO
La energía total requerida para producir una tonelada de pulpa Kraft blanqueada es aproximadamente 20% mayor que la requerida para producir una tonelada de BCTMP (Pasta quimicotermodinámica blanqueada).

La pulpa CTMP es más blanca que la pulpa Kraft sin blanquear. Consecuentemente, la contribución del blanqueo al consumo de energía total es más baja para estos procesos.

La producción de una tonelada de pulpa BCTMP requiere una cantidad de energía comprada mucho mayor que la tonelada de pulpa de Kraft blanqueada. En este último caso, el consumo de energía comprada es bajo, porque los procesos químicos cubren casi todas sus necesidades energéticas con la combustión de los sólidos del licor negro y de los residuos de madera de la fábrica.

Las nuevas tecnologías de procesos quimimecánicos, tales como APMP y PRC-APMP, poseen menores requisitos energéticos (inferiores a los 1000 kWh/t). La eficiencia de estos procesos mejora por la optimización de los tratamientos de impregnación y refinación.

En cuanto a la fabricación de papel, las máquinas de papel no recubierto consumen más electricidad y menos vapor en comparación con las de hace

10 años. La magnitud de las emisiones corresponde a la energía total consumida para producir cada tipo de papel.

EMISIONES AL AIRE

En la industria de pulpa y papel, las emisiones consideradas nocivas son de: dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), partículas (particulates), compuestos volátiles orgánicos (VOCs), agentes contaminantes peligrosos del aire (HAPs) y compuestos reducidos de azufre (TRS).

Gases y partículas

Cuando se queman combustibles que contienen azufre se genera dióxido de azufre (SO₂). La mayor parte del azufre del licor negro que entra a la caldera de recuperación regenera el sulfuro del sodio, reactivo componente del licor de cocción. El resto se emite como SO₂. Una pequeña porción se emite al aire desde la caldera de la recuperación como partículas finas del sulfato de sodio. Estas emisiones de partículas se capturan en precipitadores electrostáticos y vuelven a las calderas de recuperación. La madera tiene un contenido bajo de azufre, así que no contribuye perceptiblemente a las emisiones de SO₂ de la industria.

La contribución principal de NO_x se forma por las altas temperaturas de la combustión del nitrógeno del aire. Las emisiones de NO_x afectan el ambiente

a escala regional y local. El NO_x contribuye a la lluvia ácida y puede reaccionar con los compuestos orgánicos volátiles de la atmósfera para producir ozono. La mayoría de las fábricas controlan al NO_x optimizando la temperatura de la combustión de sus calderas.

Las partículas pequeñas que se dispersan en la atmósfera durante la combustión, también generan contaminación. El contenido de ceniza de un combustible determina la generación de partículas en la combustión. Las calderas de recuperación Kraft generan emisiones de partículas de sulfato de sodio y de carbonato de sodio. Los combustibles sólidos, como el carbón y la madera, tienen un contenido de cenizas más alto y se queman en hornos con un dispositivo de control para reducir al mínimo las emisiones de partículas.

Las partículas generan inconvenientes en el medio ambiente local. Las más grandes pueden manchar coches y edificios. Las partículas más pequeñas, de sulfato de sodio y de carbonato de sodio, viajan más lejos. Estas pueden penetrar el pulmón y ser transportadas por la sangre.

El CO₂ es un gas que se asocia al cambio climático global, pero que no crea ninguna consecuencia para el medio ambiente local o regional. El dióxido de carbono (CO₂) surge de la combustión completa del carbón en materiales orgánicos.

¹ Paper task force: (Duke University, Environmental Defense Fund Johnson & Johnson, McDonald's, The Prudential Insurance Company of America, Time Inc. "White paper no. 12: Comparison of kraft, sulfite, and BCTMP manufacturing technologies for paper", December 19, 1995.

Las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles, son la mitad de las generadas por las calderas de biomasa. En el caso de los combustibles fósiles, hay que sumar las consecuencias adicionales para el medio ambiente resultantes de su extracción, refinación y transporte. En cambio, las emisiones del CO₂ de la biomasa son balanceadas casi completamente por la captación de CO₂ de los árboles jóvenes de crecimiento rápido de las plantaciones. En síntesis, la emisión neta de CO₂ es inferior en los combustibles de fuentes renovables que en los no-renovables.

La magnitud de emisiones al aire de las fuentes de energía, depende de la mezcla del combustible usada para producir la electricidad usada en las fábricas BCTMP. Si la electricidad se genera a partir de combustibles fósiles, las emisiones de SO₂, de NO_x, CO₂ y partículas son más altas en el proceso BCTMP que en el Kraft. Sin embargo, las emisiones son muy bajas si se utiliza energía hidroeléctrica. Las fábricas de pulpa Kraft blanqueada generan la mayoría de su energía a partir de residuos de madera.

La magnitud de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de papel depende de la energía total consumida para producir el papel y de la mezcla del combustible.

Agentes contaminantes peligrosos del aire (HAPs)

Dentro de las sustancias definidas como agentes contaminantes peligrosos del aire debido a su toxicidad (HAP, Hazardous Air Pollutants), los que se encuentran en las fábricas de pulpa en porcentajes mayores al 1% son el acetaldehído, el formaldehído y el cloroformo, los tres emitidos por las fábricas de pulpa Kraft blanqueada. Estas emisiones se regulan para mantener a las cercanías de la fábrica por debajo de los niveles admitidos. La forma de controlarlas es enviar los venteos a los scrubbers (lavadores de gases) o encaminándolos al horno de cal o a la caldera de potencia, donde estos compuestos se queman como combustible.

La mayoría de las emisiones de HAP en las fábricas Kraft con blanqueo provienen de fuentes de proceso. Los HAPs energéticos son cerca de dos órdenes de magnitud más bajas que los del proceso. Como consecuencia, la antigüedad de la fábrica tiene poco efecto en la magnitud de estas emisiones.

Las emisiones de cloroformo de las fábricas kraft disminuyen cerca de 90% cuando se sustituye totalmente el cloro elemental por el dióxido de cloro en la primera etapa de blanqueo. Cuando la secuencia de blanqueo es O+100%D hay que controlar las emisiones de HAP, ya que la etapa de deslignificación con oxígeno emite un poco de metanol, etil metil cetona, acetaldehído y formaldehído. En estos casos se dan las emisiones totales más altas del HAP. Esto se debe a la fuente de agua usada en el lavado post-oxígeno.

El metanol es la principal sustancia HAP emitida por los procesos Kraft con blanqueo y los procesos mecánicos. Las emisiones al aire del proceso BCTMP son más bajas, dado que la mayoría de las sustancias orgánicas de la madera se mantiene en la pulpa.

Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs- volatile organic compounds), son una amplia gama de gases orgánicos tales como vapores de solventes y gasolina. Los árboles y otras plantas también producen altas emisiones de VOCs en tiempo cálido. El control de los VOC en las fábricas de pulpa se realiza encaminando las emisiones de las chimeneas al horno de cal y a otras calderas, donde estos compuestos se queman como combustible. El control de las emisiones de VOC es importante porque estos compuestos reaccionan con los óxidos del nitrógeno (NO_x) formando ozono, el componente principal de la niebla química.

Compuestos reducidos de azufre (TRS)

Los TRS (Total Reduced Sulfur) son emitidos por las fábricas Kraft, e incluyen al ácido sulfhídrico, al metil mercaptano, al dimetil sulfuro y al

dimetil disulfuro, todos compuestos malolientes. Estos compuestos no se consideran tóxicos, aunque algunos estudios relacionan el olor con problemas respiratorios.

El proceso de pulpado y el sistema de recuperación son las fuentes de TRS de la fábrica Kraft. La emisión de estos compuestos se reduce instalando calderas y sistemas de recuperación de bajo olor, que capturan e incineran estos gases.

EFLUENTES LÍQUIDOS

Los parámetros más importantes para describir la calidad del efluente acuoso son: los sólidos suspendidos totales (TSS), la demanda bioquímica del oxígeno (BOD), la demanda química de oxígeno (COD) y los halógenos orgánicos adsorbibles (AOX).

Sólidos suspendidos totales (TSS)

Los sólidos suspendidos tales como corteza y fibras de madera, suciedad, arena y otros, pueden causar daño a largo plazo a los hábitat benthicos en ecosistemas de agua dulce, de estuario o marinas. Los TSS (total suspended solids) pueden producir una gama de efectos, como aumentar la turbiedad del agua, cubrir físicamente y sofocar la flora benthica y la fauna inmóvil. Además, los sólidos se depositan en el fondo de los ríos o de los lagos y se descomponen reduciendo los niveles de oxígeno disuelto del agua.

En las fábricas, para reducir los TSS se utilizan los sistemas de recuperación de fibras y el tratamiento primario de efluentes.

Demanda bioquímica de oxígeno (BOD)

La BOD (biochemical oxygen demand) mide la tendencia de un efluente a consumir el oxígeno disuelto de las aguas receptoras en un tiempo preestablecido. Los microorganismos metabolizan el material orgánico del efluente consumiendo oxígeno del agua. Altos niveles de BOD en el efluente pueden privar a los peces, crustáceos, hongos y bacterias aeróbicas del oxígeno necesario para sobrevivir.

Los sistemas de tratamiento biológico secundarios pueden quitar más del 95% de la BOD del efluente crudo. En el caso de la BOD, las consecuencias para el medio ambiente están relativamente bien controladas por la legislación y la supervisión locales. En la mayoría de los casos, los límites se basan en la capacidad asimilativa del agua receptora.

Demanda química de oxígeno (COD)

Es la cantidad de compuestos oxidables presentes en el agua. La COD (chemical oxygen demand) de un efluente tratado biológicamente representa la fracción de sustancias orgánicas que los ecosistemas naturales no pueden degradar fácilmente, pero no indica la toxicidad de los efluentes en forma directa.

En el caso de efluentes TMP hay disponible una secuencia analítica que separa 5 componentes (carbohidratos, lignina, lignanos, extractivos y ácidos orgánicos de bajo peso molecular), que componen un 75-90% de la COD.

El efluente del proceso APMP se compone con las aguas de lavado de chips (astillas) tres etapas de pretratamiento e impregnación química (Impressafiner), lavado interetapas y limpieza de la pulpa.¹

Las cargas contaminantes medidas en la descarga son 56kg de BOD5/odt y 155 kg de COD/odt en un efluente combinado de 28 m³/odt. Los extractos de los tres Impressafiner fueron las corrientes más concentradas y tóxicas (12-26 g COD/L).

Los efluentes calientes y concentrados del proceso APMP son favorables a la degradación anaeróbica. La BOD5 y la COD de los efluentes se redujeron en 87-95% y 70-77%, respectivamente,

con las producciones teóricas de metano correspondientes. Los compuestos de lignina solubles en ácido disminuyeron en 34-55%, siendo los componentes principales de la COD residual, mientras que la resina y los ácidos grasos (RFA) se redujeron en 80-94%.

Con un proceso de lodos activados, se extrae un 74% de la COD del efluente completo de la fábrica, mientras que la BOD5 y los RFA se reducen completamente y el efluente tratado es no tóxico, según lo medido por el test de Microtox.

Halógenos orgánicos adsorbibles (AOX)

Los AOX (adsorbable organic halogens) son un parámetro sumario que proporciona una estimación del material organoclorado (cloro unido al carbono orgánico) en el efluente.

Según la EPA, aunque las concentraciones de AOX se pueden utilizar para determinar la cantidad de compuestos organoclorados, no proporcionan información sobre la toxicidad potencial del efluente, y por lo tanto, no es apropiado evaluar los impactos potenciales al ambiente. Sin embargo, aunque no se ha establecido una relación estadística entre el nivel de AOX y los compuestos organoclorados, el análisis de AOX puede ser un método económico para obtener una medida aproximada.

La madera en sí es fuente de precursores de dioxinas. La madera de compresión contiene concentraciones más altas de precursores que la madera normal. También contiene mayores niveles de lignina tipo cumaryl, que puede ser fuente de precursores tipo DBD y DBF.²

Las dioxinas y los furanos (solamente 2378-TCDD y 2378-TCDF) se forman

en el proceso de blanqueo con cloro. La mayor parte de la formación de 2378-TCDD y del 2378-TCDF se genera en la etapa C via la reacción del cloro con el precursor del TCDD, el dibenzo-p-dioxin (DBD) y el precursor del TCDF, el dibenzofuran (DBF). Al clorar estos precursores, la reacción dominante es sustitución electrofílica aromática. Este tipo de reacción requiere especies de cloro cargadas positivamente y la velocidad de la reacción depende de la concentración del precursor y de la concentración de cloro que esté en la forma electrofílica.

Una de las principales fuentes de precursores de dioxinas en la industria de pulpa y papel son ciertos aceites minerales que forman parte de algunas formulaciones de antiespumantes.

El efluente final generado por el proceso BCTMP tiene mucho menores cargas de BOD, COD y AOX que el efluente final de la fábrica de pulpa Kraft blanqueada.

Toxicidad

Las fuentes más comunes de toxicidad en los efluentes son los ácidos resinosos y grasos extraídos en el pulpado, el amoníaco proveniente de los nutrientes adicionados durante el tratamiento de los efluentes, el bajo oxígeno disuelto, la alta BOD y valores extremos de pH. Pueden resultar de una sobrecarga de efluentes no tratados.

Parte del fósforo (P) se introduce con la madera. Además, se agrega junto con el nitrógeno (N) como nutrientes en la planta de tratamiento secundario. Ambos elementos deben monitorearse continuamente y mantenerse en un mínimo. Valores típicos en la descarga son 2-3 mg/L para N disuelto y 0,05-0,1 mg/L para P disuelto. También se descargan con los excesos de lodo.³

¹ Lenes, M. et al. Principles of the quantification of dissolved organic material in TMP process waters using a 5-component system. TAPPI Journal, pp. 64 April 2001.
² Schnell A., Sabourin M.J., Skog S., Garvie M. "Chemical characterization and biotreatability of effluents from an integrated alkaline-peroxide mechanical pulping/machine finish coated (APMP/MFC) paper mill" Water Science and Technology Vol 35 No 2-3 pp 7-14, 1997.
³ Section V.C. Guidance by source category: Annex C, Part II Source Categories. Production of pulp using elemental chlorine or chemicals generating elemental chlorine for bleaching. Draft 15/04/04
⁴ Hynninen, P. y Viljakainen, E. Dosificación nutriente en el tratamiento biológico de aguas residuales. Diario de TAPPI, mayo de 1995, página 105.

La toxicidad del efluente puede medirse con bioensayos (con pequeños peces) o con tests de microtoxicidad (con microorganismos).

Temperatura y pH

La solubilidad del oxígeno en agua de crece con un aumento de la temperatura. Las regulaciones permiten un incremento de 20-30°C, dependiendo de la ubicación. En algunos casos, es necesaria la instalación de enfriadores. El pH debe ser aproximadamente neutro.

Color y Espuma

El color se produce principalmente por compuestos de lignina, particularmente en el efluente de la primera extracción alcalina del blanqueo kraft. Se mide en unidades de platino (Pt units, Pt-Co units, PCU, Hazen units, APHA units.) En cuanto a la espuma, su aspecto visible es más negativo que su efecto.

RESIDUOS SÓLIDOS

Las fábricas de pulpa y papel generan cinco tipos de basura sólida: basura de la playa madera, lodos de las aguas residuales; cenizas de las calderas de recuperación y de potencia; residuos sólidos del sistema de recuperación y deshechos generales de la fábrica.

Actualmente, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales primario y secundario son la porción más grande de basura sólida.

Algunos de estos residuos proporcionan energía para el funcionamiento de la fábrica y el resto se debe disponer de manera ecológica y económica. Las fábricas disponen actualmente la mayoría de la basura sólida en rellenos sanitarios, e incineran cerca del 20% de los lodos. No hay diferencia estadística en la magnitud de los residuos sólidos tota-

les generados durante la producción de pulpa Kraft blanqueada y de BCTMP.

El contenido de metales pesados en los lodos de las aguas residuales de las fábricas BCTMP se encuentra en el límite inferior del correspondiente a los de las Kraft con blanqueo. El contenido de metales pesados de ambos lodos es más bajo que el del lodo de aguas residuales municipal.

CERRAMIENTO DE CIRCUITOS DE AGUA

Los procesos de pulpado Kraft con blanqueo requieren más agua que el proceso BCTMP. Esto se repite en los consumos de agua de fábricas con circuitos cerrados:

- Kraft con blanqueo ECF: 10-30 m³/ton.
- BCTMP: 2.5 m³/ton.
- Fábrica de papel: 4-15 m³/ton

Lo más actualizado en fábricas con circuitos cerrados de agua es la de Metsä-Botnia en Rauma, Finlandia. Produce 500.000 t/año de pulpa kraft con blanqueo TCF. Los datos se comparan con los de una fábrica moderna ECF.⁶

10 m³/adt. La planta del blanqueo era parcialmente cerrada desde la puesta en marcha, enviando a los filtrados alcalinos de los lavados de las etapas P, en contra corriente, a la deslignificación con oxígeno y al lavado de la pulpa marrón.

Sin embargo, el cerramiento de circuitos de agua presenta desventajas tales como el aumento de la basura aniónica, corrosión, incrustaciones en el circuito de recuperación, pérdida de blancura de las pulpas, etc.

FÁBRICAS EFLUENTE CERO (TEF-TOTALLY EFFLUENT FREE)

Si bien esta opción sería teóricamente la mejor, el costo de llegar a esos extremos en las fábricas existentes es demasiado elevado. Un cierre gradual se justifica por ahorros en fibra, productos químicos, energía, agua y equipos. Es importante reconocer que el uso del agua debe reducirse perceptiblemente antes de que la opción de cierre total sea viable.

Fábricas BCTMP-APMP.^{7,8,9}
Hay 2 fábricas BCTMP en Canadá que

Consumo de agua (m ³ /adt)	Fábrica ECF Moderna	Fábrica TCF Metsä-Botnia
Descortezador	4,1	1,5
Digestión y lavado	0,4	0,4
Planta de blanqueo	28,1	5,1
Secado de pulpa	2,6	0,2
Evaporación y caldera recuperación	2,4	2,1
Recaustificación	1,4	1,5
Otros	1,4	0,8
Total	40,4	11,6

La fábrica fue diseñada para un cerramiento gradual. Para el comienzo del segundo año de operación, el efluente "total" de Rauma estaba por debajo de

funcionan actualmente sin ninguna descarga de efluentes acuosos. Millar Western es la primera fábrica que funcionó con efluente cero en

⁶ Reilama, I. and Merikallio, T. A modern pulpmill with a minimum environmental impact. Preprints of CPPA Technical Section Annual Meeting, Montreal, p.A349, Jan 1998.
⁷ Hardman, D. and Manolescu, D.R. Mill closure: the continuing challenge. Preprints of CPPA Technical Section Annual Meeting, Montreal, pg. A403, Jan 1998.
⁸ Young, J. Meadow Lake enters third year of zero-effluent pulp production. Pulp & Paper, March 1994, pg. 56.
⁹ Meadows, D.G. Meadow Lake marks fourth year of zero liquid effluent pulping. TAPPI Journal, pg. 63, Jan 1996.

1992. Produce 280.000 t/año de BCTMP (APMP). Junta todo el efluente y lo clarifica en una corriente. Luego lo evapora de 2% a 35% de sólidos usando 3 evaporadores, y posteriormente lo evapora hasta el 68% en 2 concentradores de película descendente, para quemarlo en una caldera de recuperación modular que produce 30 t/h de vapor de 4,4 MPa (640 PSI) y 400°C.

El fundido, que es 85-90% Na₂CO₃, se transforma en lingotes. Algo se disuelve para sustituir un poco de alcali de proceso y el resto, con las cenizas del precipitador electrostático, se transforma

en relleno sanitario. El material orgánico fibroso (incluyendo el lodo del clarificador) se quema en un incinerador. Las corrientes del evaporador y condensadores son purificadas con diferentes tecnologías y transformadas en agua limpia.

Fábricas Kraft. En caso de ser necesario, las secuencias TCF son las candidatas más seguras para cumplir con la exigencia del TEF. En las secuencias TCF es posible enviar los efluentes de blanqueo a recuperación, porque no tienen cloruros. Con esto se elimina la principal carga contaminante de la fábrica de pulpa química.¹⁰

Las secuencias de ECF también cumplen con los estándares ambientales y son menos costosas. En este caso, las tecnologías para trabajar con efluente cero existen, pero son más complejas y costosas.

REGULACIÓN INTERNACIONAL SOBRE DESCARGAS DE AFLUENTES EN LA INDUSTRIA DE PULPA Y PAPEL¹¹

La tabla siguiente presenta la evolución de las exigencias sobre descarga de AOX en diferentes países:

Los límites de distintos parámetros para fuentes existentes (pretreatment standards for existing sources, PSES) y para nuevas fuentes (new source performance standards, NSPS) de fábricas de pulpa y papel kraft (y soda) blanqueados son:

Los clorofenoles regulados son: triclorosiringol; triclorofenol (2,4,5 y 2,4,6); triclorocatecol (3,4,5 y 3,4,6); tricloroguayacol (3,4,5 y 3,4,6 y 4,5,6); tetraclorocatecol y tetracloroguayacol; y pentaclorofenol.

Los valores de COD aparecerán en la fase II.

	Limite de AOX (kg/adt)*	Año en que se requirió
Alemania	1,0	1990
Finlandia	1,4	1995
Suecia	0,5	1995
Noruega	2,0	1995
Canada - BC	1,5/0,0	1995/2002
Canada - Ontario	1,5/0,8	1995/1999
US EPA Cluster Rule	0,272 - 0,951	2000 o 2001
Australia	1,0 (promedio anual) 2,5 (un ensayo)	
Banco Mundial	0,4**	

* El nivel más bajo de detección es 0,156 kg/t

** World Bank - Pollution Prevention and Abatement - pulp and paper mills - 1996.

	FUENTE EXISTENTE		NUEVA FUENTE*	
	Máximo diario	Promedio mensual	Máximo diario	Promedio mensual
TSS (kg/ t)	8,8	3,9	8,47	3,86
BOD5 (kg/ t)	4,3	2,2	4,52	2,41
AOX (kg/ t)	0,951	0,623	0,476	0,272
2,3,7,8 TCDD (pg/L)*	< ML**	No aplicable	< ML**	No aplicable
2,3,7,8 TCDF (pg/L)*	31,9	No aplicable	31,9	No aplicable
Clorofenoles (µg/L)*	< ML**	No aplicable	< ML**	No aplicable
Cloroformo (g/ t)*	6,92	4,14	6,92	4,14

* Referido a un efluente de la planta de blanqueo

** < ML: menor que el nivel mínimo detectable por el equipo

¹⁰ Towards Zero-Effluent Pulp and Paper Production: The Pivotal Role of Totally Chlorine Free Bleaching, Paul A. Johnston, Ruth L. Stringer, David Santillo, Angela D. Stephenson, Irina Ph. Labounskaia, Hannah M.A. McCartney, November 1996. <http://archive.greenpeace.org/toxics/reports/tcf/tcf.html>. Consulta: 26 agosto 2005.

¹¹ Paper help online, 1.4.2.1 Environment Management Standards. https://www.paperloop.com/ipp_mag/paperhelp/homepage.fhtml. Consulta: agosto 2005

P.M

AUTORES

LA DRA. MARIA CRISTINA AREA

(PhD., MSc, Ing. Qca.) es Directora del Programa de Investigación de Celulosa y Papel (PROCYP) y Directora del Instituto de Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible (ICADES).

Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales – Universidad Nacional de Misiones, en Argentina.

Tel/Fax: 54-3752- 422198 -

m_c_area@fceqyn.unam.edu.ar

Rotear con un círculo el n° 179 en la tarjeta de información