PRODUCCIÓN LIMPIA DE PAPEL RECICLADO: HACIA LA SOSTENIBILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL EN LA COMUNIDAD DE MADRID-PROLIPAPEL II

A. Blanco*, M.C. Monte, R. Miranda
Departamento de Ingeniería Química
(Universidad Complutense de Madrid-Facultad de Ciencias Químicas)
Avda. Complutense, s/n - 28040 Madrid - España
E-mail: ablanco@ucm.es

Resumen. PROLIPAPEL II es un proyecto cuyo objetivo último es alcanzar una producción sostenible de papel en la Comunidad de Madrid (España). En el proyecto colaboran el Grupo de Celulosa y Papel de la Universidad Complutense de Madrid, el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), el Centro de Investigaciones Biológicas (CIB-CSIC), el Centro de Investigaciones, Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y la Universidad Carlos III que trabajan en los siguientes temas específicos:

- Materia prima (recuperación): aumento de la recuperación, predicción de la calidad y de los ajustes del proceso necesarios para mitigar la peor calidad del papel recuperado.

- Proceso de producción (reciclado): optimización de procesos, minimización del consumo de agua, energía y productos químicos. Eliminación de contaminantes recalcitrantes.

* A quien debe enviarse toda la correspondencia

- Generación de residuos (valorización energética por gasificación de residuos no reutilizables).

- Producto: Aumento de la reciclabilidad y mejora de la calidad y de la impresión.

- Gestión de empresas: estrategias de Recursos Humanos para favorecer la innovación.

Algunos de los resultados más significativos alcanzados demuestran la importancia de los sistemas de recogida selectivos para mantener la calidad de la materia prima; la posibilidad de minimizar la contaminación de las aguas de proceso variando las condiciones de pulpeo y de reducir un 20-60% el consumo de agua fresca por diferentes vías; la posibilidad de sustituir el 100% del agua de alimentación por agua regenerada municipal; la viabilidad del tratamiento de gasificación de los residuos; o la correlación entre el carácter innovador de la gestión de recursos humanos, atracción y retención del talento y los resultados obtenidos.

Palabras clave: Fabricación de papel, Proceso sostenible, Reciclado de papel, Uso sostenible del agua, Valorización de residuos

1. Introducción

La industria papelera española es líder europeo en reciclaje de papel: en el año 2012, un 82,3% del papel fabricado utiliza papel recuperado como materia prima frente al 72% de la media europea (ASPAPEL, 2013). En la Comunidad de Madrid, el 100% del papel producido utiliza papel recuperado como materia prima. Las ventajas económicas y medioambientales que supone la utilización de papel recuperado como materia prima han hecho aumentar la demanda de papel recuperado a nivel mundial, por lo que es

necesario extender los límites del reciclado de papel actuales, en términos de disponibilidad y de calidad del papel recuperado (COST, 2009).

En 2012 en España se recuperó casi un 74% del papel usado. Este dato nos sitúa a la cabeza del reciclaje de Europa, sólo por detrás de Alemania y más o menos empatados con Francia e Italia (ASPAPEL, 2013). El mayor potencial de recogida se concentra en el canal municipal, sobre todo en la recogida selectiva doméstica, donde la recuperación es tan solo del 50% frente al 95% del canal industrial. Pero no sólo es importante aumentar la disponibilidad de papel recuperado sino también mantener su calidad (Blanco y col., 2004; Faul, 2005) o mejorar el proceso de fabricación para utilizar papel recuperado de peor calidad y obtener productos de la misma o incluso mejor calidad (Miranda y col., 2011).

Estos hechos justifican la necesidad de un soporte científico y técnico que permita avanzar a la industria hacia un proceso productivo más sostenible, eficiente y responsable, aplicando tecnologías innovadoras cada vez más respetuosas con el medio ambiente, líder en recuperación y reciclaje, generando riqueza y cubriendo las demandas de la Sociedad.

El objetivo del Proyecto PROLIPAPEL es alcanzar "El Reciclado Sostenible de Papel", mediante la adecuada gestión de las materias primas (recuperación), la producción limpia (reciclado) disminuyendo el consumo de agua, energía y productos químicos; aumentando la calidad del producto (reciclabilidad) y la mejor gestión de sus residuos (valorización de rechazos). Asimismo, se analiza la gestión de las empresas desde la óptica de los recursos humanos para mejorar la gestión del capital humano. Se han definido, por tanto, los siguientes objetivos científico-tecnológicos (OCT's):

- **OCT-1: Aumento de los límites de reciclaje.** Una etapa clave en la gestión sostenible de las materias primas es asegurar la disponibilidad y la calidad del papel recuperado aumentando la tasa de recogida mediante una mejor concienciación ciudadana y una mejor clasificación del papel recuperado.
- **OCT-2: Modelos de predicción de la calidad del papel usado en el futuro.** Aunque la evolución de la calidad de las materias primas es muy lenta, los modelos muestran la importancia de la adaptación de los esquemas productivos,

para mitigar el aumento de materias impropias y la menor blancura del papel recuperado.

- **OCT-3: Mejora de la reciclabilidad de los productos.** Se ha estudiado la reciclabilidad de los productos de la Comunidad de Madrid para proponer mejoras que no afecten a la producción, a la calidad, ni al coste. También se considera la influencia de las distintas técnicas de impresión.
- **OCT-4: Gestión sostenible del agua.** Se estudia la optimización de los tratamientos internos que se utilizan como "sistemas riñón" para una mayor eliminación de materia disuelta y coloidal. Se estudia la ultrafiltración como tratamiento interno para alcanzar agua de gran calidad que se reutilice en las duchas de la mesa de formación y en la preparación de productos químicos, en especial se estudia el tratamiento del concentrado y el ensuciamiento de las membranas. Además, para disminuir la liberación de contaminantes se ha estudiado el destintado neutro, y se ha desarrollado una metodología para la cuantificación en línea de la materia disuelta y coloidal por espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR). Además se ha trabajado en el desarrollo de nuevos tratamientos enzimáticos para aumentar la eliminación de la materia disuelta y coloidal de las aguas de proceso.
- **OCT-5: Disminución del consumo energético.** En el Proyecto se determina la huella energética de cada operación del proceso para, posteriormente, desarrollar mejoras que disminuyan el consumo..
- **OCT-6: Desarrollo de modelos de predicción de la calidad de impresión de papeles reciclados.** Se estudia la influencia de la forma y tamaño de la impresión en el valor del *print through* (percepción visual de la imagen impresa por la cara contraria) y su relación con parámetros macroscópicos y microscópicos del papel.
- **OCT-7: Gestión sostenible de residuos**. Se estudia la valorización energética de los rechazos, fundamentalmente plásticos, mediante gasificación para minimizar el impacto medio ambiental. La gasificación de rechazos puede ser complementada con el uso de lodos de destintado. Si el proceso es viable, el gas pobre producido en la gasificación puede usarse en las calderas de cogeneración.

Una etapa posterior de optimización de la calidad del gas permite introducir el gas en motores y complementar la cogeneración.

- **OCT-8: Sistemas de RRHH en relación a la innovación y mejor gestión del personal**. Se ahonda en el estudio de las estrategias de gestión del capital humano de las empresas desde una triple perspectiva: las estrategias para atraer y retener el talento, a través de las cuales estimular la innovación en las empresas y aumentar la productividad de los trabajadores.

2. Resultados

A continuación se exponen algunos de los resultados más significativos alcanzados por la UCM.

2.1. OCT-1 Aumento de los Límites de Reciclaje

La recuperación y utilización de papel recuperado como materia prima ha aumentado de forma muy importante a lo largo de las últimas décadas alrededor de todo el mundo, y esta tendencia se prevé que continúe debido a razones económicas, medioambientales y sociales. En las regiones donde la tasa de reciclaje es ya muy elevada, como por ejemplo Europa (71,7%) (CEPI, 2013) o España (82,3%) (ASPAPEL, 2013), se necesitan de esfuerzos adicionales para seguir extendiendo los límites del reciclaje.

Para seguir incrementando el reciclaje de papel son necesarias las siguientes mejoras. En primer lugar, es necesario incrementar la disponibilidad de papel recuperado a través de sistemas de recogida más eficientes (evitando el uso de sistemas de recogida conjunta de reciclables) y minimizar la competencia con usos energéticos y las exportaciones. Segundo, es necesario extender las actividades de clasificación, que puede lograrse reduciendo los costes de la clasificación mediante el uso de sistemas de clasificación automáticos. Tercero, existe la necesidad de mejorar la reciclabilidad de los productos mediante el compromiso de las industrias de impresión y transformación para que utilicen tintas de impresión y adhesivos compatibles con el reciclado. Finalmente, la conciencia medioambiental de los ciudadanos también es una importante

fuerza impulsora para extender las actividades de reciclado que afecta no sólo a la recogida de papel si no a todas las etapas de la cadena de reciclado de papel.

En cuanto al **aumento de la disponibilidad de papel recuperado** es necesario considerar no sólo el volumen adicional de papel recuperado si no también, y de forma muy importante, la calidad del mismo. Sin embargo, el aumento de la disponibilidad de papel suele llevar aparejado un detrimento de su calidad; bien porque a medida que aumenta la demanda se explotan fuentes más dispersas y de peor calidad como el papel proveniente de los hogares, o bien porque se utilizan sistemas de recogida conjunta de reciclables, que obtienen un papel de peor calidad que el recogido por sistemas de recogida selectivos (Faul, 2005). En la Fig. 1, por ejemplo, se observa como el contenido en materias impropias (componentes no papeleros y materias indeseadas) y la humedad del papel recuperado en España aumentaron conforme aumentó la tasa de recogida de papel recuperado. En sólo cuatro años, 2005-2008, y debido al importante crecimiento en la recogida de papel de los hogares (cercano al 30%), el contenido en materias impropias aumentó del 5,5 al 8,7%, y la humedad del 6,6% al 8,3% (Miranda y col., 2011).

Relacionado con el aumento de la disponibilidad de la materia prima es **el sistema de recogida de papel utilizado**. Tradicionalmente se han utilizado sistemas de recogida selectiva, sin embargo, en los últimos años, cobran cada vez más importancia los sistemas de recogida conjunta de reciclables, especialmente en Estados Unidos y Reino Unido, pero también extendiéndose a otros países como Francia (Faul, 2005). En estos sistemas, todos los materiales reciclables se recogen de forma conjunta en un mismo contenedor, e incluye una mezcla de papel y cartón, vidrio, latas, plásticos, etc. Aunque estos materiales son posteriormente clasificados en una planta de clasificación, el papel obtenido por estos medios está altamente contaminado, con un contenido en materias impropias de entre el 5% y el 20%, comparado con un contenido <1% cuando se utilizan sistemas de recogida selectivos. Aunque se ha considerado que los métodos de recogida conjunta de reciclables permiten aumentar las tasas de recogida y, consecuentemente, la disponibilidad de papel recuperado, con un coste inferior. Sin embargo, la conversión de sistemas de recogida selectivos a sistemas de recogida conjunta de reciclables ha sido considerado como una de las mayores amenazas a la

calidad del papel recuperado y a un uso extendido del reciclaje, especialmente en los países donde están más extendidos (Sacia and Simmons, 2006).

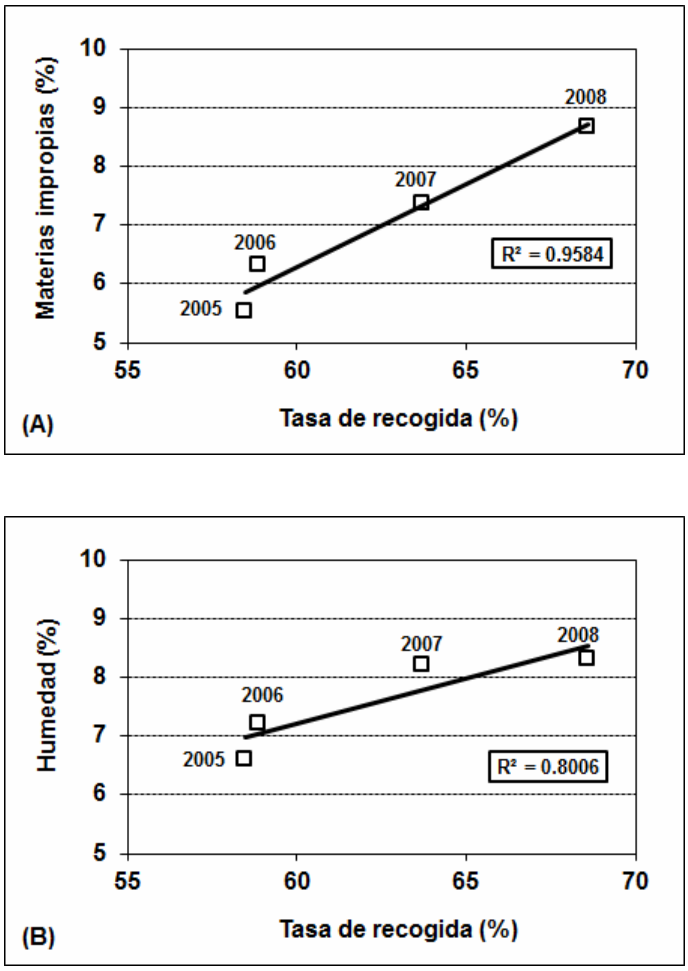

Fig. 1. Correlación entre el contenido en materias impropias (A) y la humedad (B) del papel recuperado con respecto a la tasa de recogida de papel en España. Fuente: Miranda y col., 2011

Existen fábricas en España que, dada la escasez de papel recuperado, importan papel recuperado de los países cercanos, principalmente Francia y Portugal, pero también de Reino Unido. En el marco del programa PROLIPAPEL se analizó la calidad de un papel importado de Reino Unido utilizado por una fábrica española de papel prensa (Miranda y col., 2013). Debido a que en Reino Unido es mayoritario el uso de sistemas de recogida conjunta de reciclables, la calidad del papel importado es

tan baja que la cantidad máxima de papel que pueden utilizar de esta fuente es muy limitada. Primero, se caracterizó el contenido en materias impropias del papel recuperado importado de las plantas de clasificación convencionales que operaban en Reino Unido y se obtuvo que variaba entre el 1% y el 29%, con un valor promedio del 11,9% (Fig. 2A). Después, el suministrador de papel recuperado, con el fin de obtener una mejor calidad del papel recuperado, instaló una nueva planta de clasificación menos saturada, con sistemas más eficientes y con las más avanzadas tecnologías de clasificación. En este caso, el contenido en materias impropias varió entre el 0,3% y el 1,6%, con un valor promedio del 8,1% (Fig. 2B). Aunque la calidad ha mejorado con esta nueva planta de clasificación, la calidad de este papel es todavía muy inferior a la que tiene el papel recuperado proveniente de sistemas de recogida selectiva. Por eso, a pesar de la escasez de papel recuperado de la fábrica, no se recurre a más de un 4% de papel recuperado proveniente de estas fuentes.

Las **actividades de clasificación** también son de gran importancia, especialmente cuando se están explotando fuentes de baja calidad. La clasificación es todavía una actividad manual pero se están llevando a cabo grandes esfuerzos para automatizar esta actividad y, de esta forma, reducir los costes, que es el obstáculo más importante de cara a un mayor grado y eficacia de la clasificación. En este sentido, se están llevando a cabo grandes esfuerzos en el desarrollo de tecnologías basadas en sensores (visible, IR, etc.).

Cuando las tasas de reciclado son muy elevadas, los productos papeleros deben ser reciclables y amigables con el medio ambiente, de esta forma que se pueda mantener el ciclo activo. La **reciclabilidad del papel recuperado** se puede conseguir a través de la utilización de tintas y adhesivos amigables con el medio ambiente. La utilización de tintas flexo o digitales en algunos papeles gráficos hace que estos papeles no puedan reciclarse de forma efectiva en sistemas de tratamiento convencionales y, por tanto, su uso está muy limitado, p.ej. un 10% máximo de periódicos impresos con flexo en algunas fábricas del Reino Unido (White, 2007). También se ha trabajado mucho en el desarrollo de adhesivos reciclables, que no den problemas por formación de depósitos o “stickies” en el proceso, que originan problemas tanto en el proceso como en la calidad del producto final. En este sentido hay que lograr el compromiso de las industrias de

impresión y transformación para que utilicen tintas de impresión y adhesivos compatibles con el reciclado.

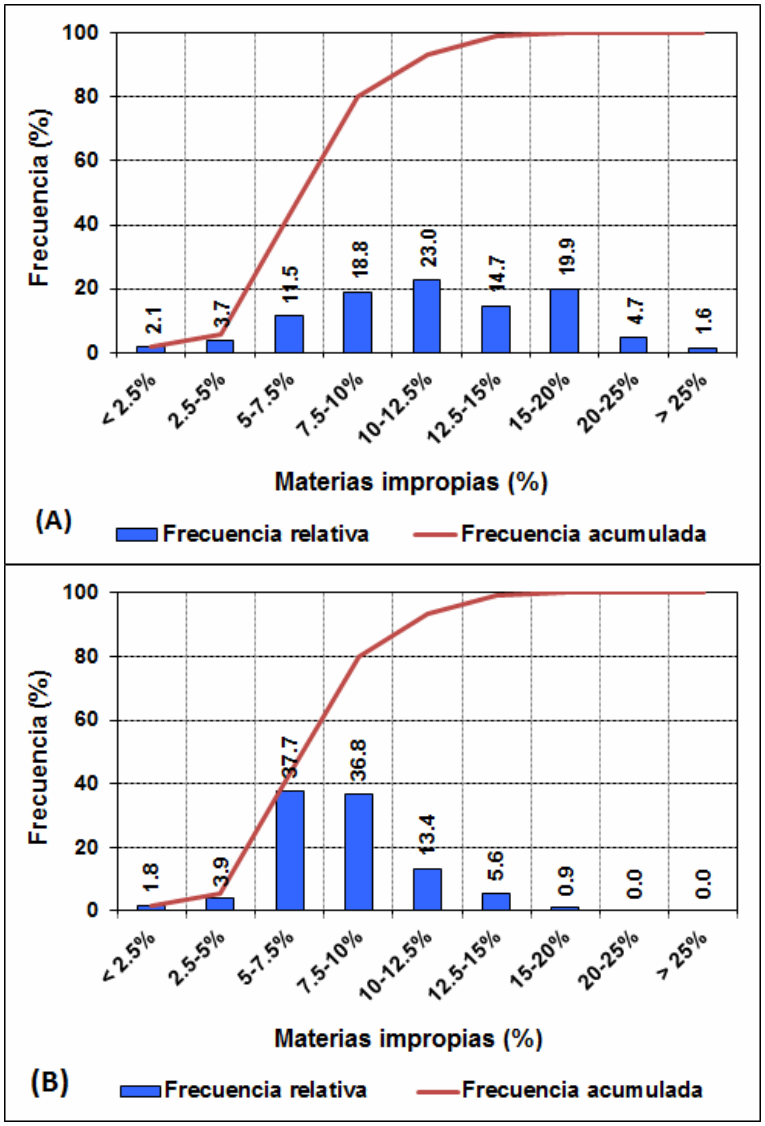

Fig. 2. Contenido en materias impropias del papel importado de Reino Unido proveniente de la recogida conjunta de reciclables: antes (A) y después (B) de la instalación de la nueva planta de clasificación. Fuente: Miranda y col. (2013).

Finalmente, la **conciencia ambiental** es un aspecto muy importante que afecta a todas las etapas de la cadena de reciclado de papel. La conciencia ambiental no sólo es importante para aumentar la tasa de recogida, si no para el reciclado en general

(actitudes medioambientales). Basado en una encuesta europea, la conciencia ambiental de los ciudadanos fue señalada como una de las más importantes fuerzas impulsoras para obtener no sólo un mayor volumen de papel recuperado si no también de mejor calidad (Miranda y Blanco, 2010). Dado que otras fuentes de papel recuperado (canal industrial y comercial) están muy explotadas, el potencial futuro para aumentar la disponibilidad de papel recuperado reside en la recogida del papel de los hogares. Sin los esfuerzos de segregación en la fuente y recogida selectiva, requisitos indispensables para el reciclaje sostenible, sería muy difícil extender los límites del reciclado de papel.

2.2. OCT-4 Gestión Sostenible del Agua

Se ha llevado a cabo el **pilotaje de una unidad de ultrafiltración** para depurar el filtrado claro del circuito de máquina y permitir la reducción del consumo de agua fresca en un 60% al sustituir el agua de las regaderas de alta y baja presión destinadas a la limpieza de telas y rodillos. La calidad del agua perneada siempre está en los valores adecuados para su uso posterior. Los cambios en la calidad del agua de entrada, especialmente en la concentración de sólidos en suspensión totales, afectaron severamente a las membranas. Los concentrados de la ultrafiltración se recirculan al filtro de discos para recuperar más agua en el proceso. Parte del agua tratada en el filtro de discos vuelve a pasar por la ultrafiltración y parte de ella se recupera mediante flotación por aire disuelto en el proceso. Una mínima cantidad de agua de permeado se utiliza para las limpiezas químicas (Ordoñez y col, 2010).

Por otra parte, con el fin de estudiar el **efecto de las condiciones de pulpeo** de las materias primas sobre la liberación de contaminantes a las aguas se han realizado ensayos en diferentes condiciones de pulpeo (Tabla 1) utilizando como materia prima una mezcla de papel de periódico y revista 50/50.

Los resultados obtenidos muestran que se puede reducir un 30-50% la contaminación de las aguas de proceso mediante el empleo de una química de pulpado neutra o alcalina reducida (Fig. 3).

Tabla 1. Condiciones de pulpeo.

	Alcalino reducido	Neutro	Alcalino 1	Alcalino 2	Alcalino 3
NaOH (%)	-	-	0.50	0.75	1.0
H_2O_2 (%)	-	-	0.50	0.75	1.0
Na_2SiO_3 (%)	2.0	-	1.0	1.50	2.0
Jabón (%)	-	-	0.30	0.45	0.60
Surfactante (%)	0.1	0.1	-	-	-

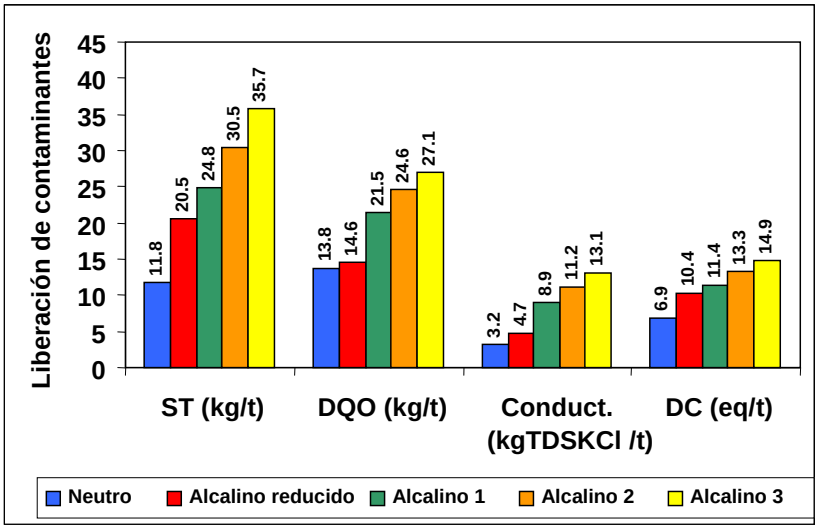

Fig. 3. Efecto de las condiciones de pulpeo en la liberación de contaminantes

También se ha analizado a escala de laboratorio **la influencia de la etapa de destintado** por flotación en la liberación de contaminantes a las aguas, igual que en el caso anterior, con mezclas de periódicos y revistas usados (50/50) como materia prima. Se ha estudiado la mejora de la química tradicional de destintado (silicato sódico y jabón) con la adición también otros surfactantes comerciales.

La adición de un nuevo surfactante ha demostrado ser muy importante en la carga contaminante de las aguas después del tratamiento, especialmente en el caso de la DQO que es uno de los parámetros de contaminación más importantes de las aguas y que limita una mayor reutilización del agua en la planta. En concreto, la sustitución parcial

de silicato sódico y jabón por surfactantes en el destintado reduce un 25-35% la DQO de las aguas (Fig. 4).

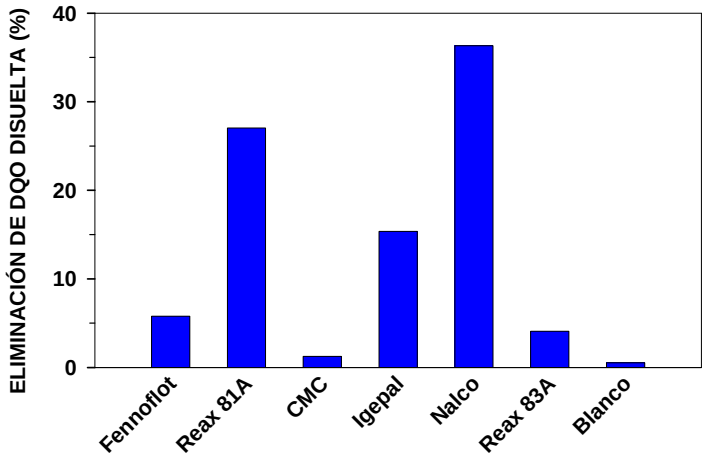

Fig. 4. Eliminación de DQO disuelta durante el proceso de flotación dependiendo del surfactante utilizado

Así mismo, el **blanqueo** con tiosulfato sódico en vez de con peróxido de hidrógeno también minimiza la liberación de los contaminantes a las aguas (Fig. 5).

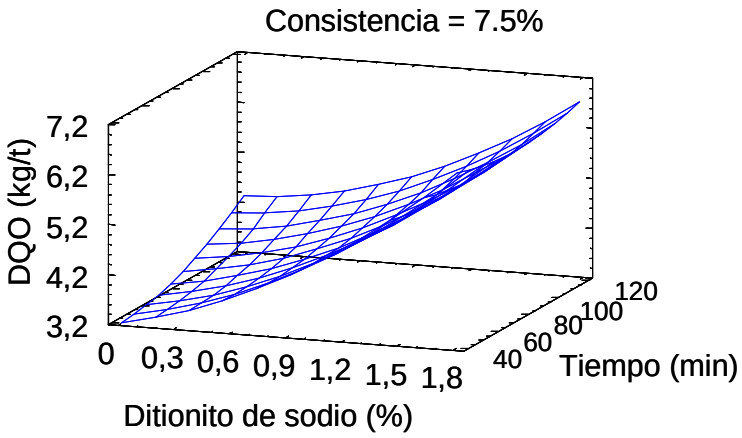

Fig. 5. Superficie respuesta para la DQO disuelta durante la etapa de blanqueo

Dentro de este OCT también se ha llevado a cabo un **pilotaje en la EDAR** de la Cuenca Media-Alta de Arroyo Culebro (Madrid) para tratar su efluente y hacerlo apto para su consumo como agua fresca en una fábrica de papel (Fig. 6). Tras analizar diferentes combinaciones se optó por tres sistemas multibarrera: microfiltración presurizada con membranas de fibra hueca, ultrafiltración sumergida con membranas en espiral y ultrafiltración sumergida con membranas de fibra hueca, seguidos todos estos tratamientos de unidades de ósmosis inversa y ultravioleta. Los resultados obtenidos han demostrado que los tres sistemas son aptos para producir agua regenerada de la calidad deseada, pudiendo sustituir el 100% del agua de alimentación de la fábrica de papel e incluso puede ser utilizada para la preparación de productos químicos (Ordoñez y col. 2011).

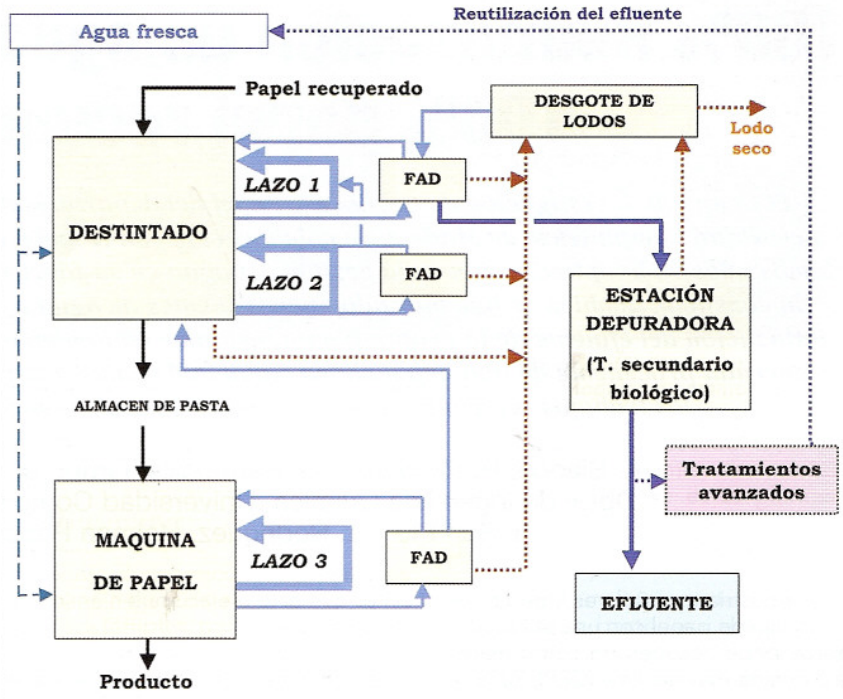

Fig. 6. Utilización de agua regenerada en una fábrica de papel reciclado

2.4. OCT-7 Gestión Sostenible de Residuos

Dentro de este OCT se estudió la viabilidad del aprovechamiento de los residuos sólidos obtenidos en una industria papelera mediante su gasificación, con el fin de obtener un combustible que pueda ser alimentado a un motor y/o complementar la cogeneración. En primer lugar, fue necesario preparar los residuos objeto de estudio (rechazos y lodos de destintado), eliminando previamente los contaminantes metálicos y piedras, y, posteriormente caracterizarlos. Los análisis de caracterización realizados incluyeron la determinación de la humedad, del contenido en cenizas a 550 ºC, volátiles y carbono fijo; el análisis elemental (carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y cloro); la estimación del poder calorífico; el análisis de los elementos mayoritarios y minoritarios en cenizas; el contenido en biomasa en la fracción de rechazo; y el análisis termogravimétrico.

Los resultados obtenidos muestran que los **rechazos** puede considerarse un combustible viable para la valorización energética mediante gasificación desde el punto de vista de su composición. Sin embargo, el principal factor limitante para su conversión energética vía gasificación es el elevado contenido en cloro, que en atmósfera reductora daría lugar a su emisión en los gases en forma de HCl principalmente. Su eliminación no es compleja, ya que se podría eliminar por lavado con agua. Sin embargo, supondría un muy elevado problema de corrosión en los equipos. Por este motivo no se recomienda emplearlo como combustible único en el proceso de gasificación.

Por otra parte, la caracterización de los **lodos de destintado** muestra su bajo poder calorífico, debido a su contenido en compuestos inorgánicos. Sin embargo, está prácticamente libre de cloro.

En resumen, cada uno de los combustibles por separado, presentaría problemas para su conversión térmica mediante gasificación. Sin embargo la gasificación de sus mezclas sería viable desde el punto de vista tecnológico y medioambiental, si bien es necesaria la limpieza del gas bruto producido, para cumplir la tolerancia de los motores de gas y la legislación medioambiental.

3. Conclusiones

Puede concluirse que los resultados alcanzados en este proyecto y su impacto están relacionados con:

- Un proceso de fabricación de papel de menor impacto ambiental.
- Una mejora de la calidad del producto y disminución de los costes de fabricación
- Una mejor concienciación medioambiental y mejora de los sistemas de clasificación del papel recuperado utilizado como materia prima
- El aumento de la reciclabilidad de los productos papeleros.
- El menor consumo energético. Uso de energía renovable.
- La optimización del proceso de destintado, mediante la reducción del consumo de productos químicos y de la liberación de contaminantes.
- El uso sostenible del agua.
- La mejora de la calidad del papel: disminución del *print through*, etc.
- La reducción de las necesidades de tinta en los papeles de impresión fabricados a partir de papel recuperado (menor coste y mejora de la reciclabilidad).
- La valorización energética de todos los residuos sólidos generados.
- La mejora en la gestión del capital humano que podrá ser aplicado posteriormente a otros sectores industriales de la Comunidad de Madrid. Políticas de atracción y retención de talento y de innovación.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Comunidad de Madrid por la financiación recibida para la realización del presente trabajo a través del Proyecto PROLIPAPEL II-CM (P2009/AMB-1480).

Referencias

ASPAPEL. Memoria de Sostenibilidad 2013 (2013).

Blanco, A., Negro, C., Monte, C., Fuente, E., Tijero J. (2004). The challenges of sustainable papermaking. *Environ. Sci. and Tech.* 38(21), 414A-420A.

Blanco, A., Miranda, R., Monte M.C. (2013). Extending the limits of paper recycling – Improvements along the paper value chain. *Forest Systems* (en prensa).

CEPI. 2012 CEPI Key Statistics. Bruselas (Bélgica) (2013).

COST. The limits of Paper Recycling. Bruselas (Bélgica) (2009).

Faul, A. (2005). Quality aspects of recovered paper for deinking. *Progr. in Pap. Rec.* 15(1), 6-10.

Miranda, R., Blanco, A. (2010). Environmental awareness and paper recycling. Cellul. Chem. Technol. 44(10), 431-449.

Miranda, R., Monte, M.C., Blanco, A. (2011). Impact of increased collection rates and the use of commingled collection systems on the quality of recovered paper. Part 1. Increased collection rates. *Waste Manag.* 31(11), 2208–16.

Miranda, R., Monte, M.C., Blanco, A. (2013). Analysis of the quality of the recovered paper from commingled collection systems. *Res., Cons. and Rec.* 72, 60– 66.

Ordóñez, R., Hermosilla, D., San Pío, I., Blanco, A. (2010). Replacement of fresh water use by final effluent recovery in a highly optimized 100% recovered paper mill. *Water Sci. & Tech.* 62(7), 1694-1703.

Ordóñez, R., Hermosilla, D., San Pío, I., Blanco, A. (2011). Evaluation of MF and UF as pretreatments prior to RO applied to reclaim municipal waste water for fresh water substitution in a paper mill: A practical experience. *Chem. Eng. J.* 166, 88-98.

Sacia, W.K., Simmons, J. (2006). The effects of changing ONP quality on a newsprint mill. *Tappi J.* 5(1), 13-17.

White, C. 2007. Quality matters: the mill buyers perspective. European Paper Recycling Conference, Amsterdam (The Netherlands), Oct. 3-5.