



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Cs. De la Ingeniería c/m en Ingeniería
Química.

**Evaluación del comportamiento de la tecnología de separación por membranas en el
tratamiento de efluentes de blanqueo de la industria de celulosa kraft de *Pinus radiata*
con vistas a la recuperación de agua y de productos químicos.**

**(Assessment behavior of membrane separation technology in the treatment of kraft
pulp mill bleaching effluent of *pinus radiata* overlooking recovery of water and
chemicals).**

ELIZABETH DEL PILAR OÑATE CEA

CONCEPCIÓN-CHILE

ENERO 2013

Profesor Guía: Dr. Claudio Zaror Zaror
Dpto. de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción.

Resumen

La industria de celulosa kraft ha implementado numerosas modificaciones en su proceso productivo con objeto de disminuir su consumo neto de agua, alcanzando, la reducción del consumo hídrico hasta 40 m³ de agua por tonelada de pulpa producida. No obstante, el aumento de la temperatura ambiental por efecto del cambio climático global y la creciente demanda de celulosa, contribuyen a una significativa reducción del potencial hídrico y considerables impactos ambientales. Se presume que, el comportamiento de los sistemas de filtración por membranas, según parámetros operacionales y de ensuciamiento, permitiría la aplicación de esta tecnología al tratamiento de efluentes de blanqueo de celulosa kraft de *Pinus radiata*, obteniéndose una adecuada separación de compuestos orgánicos, de acuerdo con la distribución de pesos moleculares, y recuperación de agua. Logrando así un mayor cierre de circuitos y una reducción de la carga contaminante de los efluentes finales. Para probar esta hipótesis, este trabajo plantea evaluar el comportamiento de sistemas de filtración por membranas (ultrafiltración/nanofiltración/osmosis inversa) en la purificación de efluente de blanqueo alcalino con vistas a la recuperación de agua y de productos químicos, proveniente de la industria de celulosa kraft de *Pinus radiata* con blanqueo libre de cloro elemental. El efluente de blanqueo alcalino fue obtenido de una planta local de celulosa ubicada en la cuenca del río Bío-Bío. Para llevar a cabo el estudio se abordaron tres objetivos específicos:

Evaluar el comportamiento de sistemas de filtración por membrana en función de parámetros operacionales y de ensuciamiento para la obtención de concentrados y permeados de la corriente de efluente de blanqueo alcalino de celulosa kraft de *Pinus radiata*.

Caracterizar muestras de permeados y concentrados sobre la base de su composición fisicoquímica y toxicidad, con miras a la recuperación del recurso hídrico para su potencial reciclaje en el proceso de blanqueo de la pulpa.

Evaluar y establecer una estrategia de cierre de circuito de agua y recuperación de reactivos químicos provenientes del efluente de blanqueo alcalino de celulosa kraft de *Pinus radiata*.

La filtración secuencial del efluente produjo una disminución gradual de la densidad de flujo de permeado para todos los cortes. La reducción está estrechamente ligada al material de la membrana y su corte molecular. La membrana hidrofóbica de polietersulfona de 2 kDa se ensucia muy rápidamente presentando la menor densidad de flujo de permeado.

Para la ultrafiltración en la mayoría de los casos, los modelos de ensuciamiento combinados presentan el mejor ajuste en comparación a los modelos clásicos, predominando los modelos de bloqueo completo-formación de queque para los cortes más altos (20 y 10 kDa), y bloqueo intermedio-formación de queque para los cortes más bajos (5 y 1 kDa). Para la membrana de 2 kDa se supone la presencia de todos los mecanismos de ensuciamiento. No obstante, en todos los casos, la constante por formación de queque es dominante. Las membranas de 20 y 2 kDa presentaron mayor ensuciamiento por formación de queque estando estrechamente relacionado con su material menos hidrofílico.

El aumento de la temperatura (50°C) causa un incremento de la densidad de flujo de permeado, sin embargo, el orden secuencial de las densidades de flujo de permeado es consistente con el orden secuencial de las densidades de flujos evaluados a 25°C, existiendo directa relación con el material de cada membrana. El ensuciamiento de las membranas es concordante con los mecanismos de ensuciamiento a bajas temperaturas. La membrana de 5 kDa a altas temperaturas presentaría ensuciamiento interno dado la expansión térmica de los poros de la membrana.

El efluente de blanqueo de la industria de celulosa kraft filtrado secuencialmente por ultrafiltración/nanofiltración/osmosis inversa alcanza una recuperación del 99% en base a la demanda química de oxígeno, color y cloruros. Un 96%, 99,9%, 88% y 97% de remoción de halógenos orgánicos adsorbibles, sulfatos, conductividad y fenoles, respectivamente.

La membrana de 20 kDa es eficiente en la retención de compuestos de alta masa molar (50kDa), y todas las membranas de la secuencia son eficientes en la retención de compuestos con masa molar de 700 y 60 Da. La formación de la capa de ensuciamiento actuaría como una segunda barrera selectiva. La membrana de ultrafiltración de 5 kDa mostró buena capacidad de retención. Los compuestos tóxicos detectados en el efluente alcalino, son gradualmente eliminados a través de la secuencia de filtración alcanzando un 9% de toxicidad.

De acuerdo a los resultados encontrados, se sugiere un sistema de filtración secuencial de ultrafiltración/nanofiltración/osmosis inversa constituido por cortes de 20 y 5 kDa para la ultrafiltración, seguidos de un corte para la nanofiltración (>98% Na_2SO_4) y osmosis inversa (>98% NaCl). El agua recuperada es apta para ser utilizada como agua de lavado de pulpa química blanqueada, agua de refrigeración y agua de condensado, recuperandose un 5, 75 y 28%, respectivamente. Los costos de tratamiento se reducen en un sistema secuencial de filtración, dado que, los costos operacionales disminuyen progresivamente en la medida que mejora la calidad del permeado. El efluente de blanqueo alcalino puede ser tratado mediante la tecnología de filtración por membranas en 4 etapas sucesivas con un costo total de 0,32 US\$/m³ de efluente, y un requerimiento energético de 0,84 kWh/m³ de efluente asociado a un costo energético de 313 kUS\$/Año y un costo de mantención estimado de 52 kUS\$/año. El agua recuperada tiene un costo de 0,92 US\$/m³ de permeado. Se sugiere la recuperación de bisfenol A y ácidos resínicos como subproductos de valor comercial.