

Resumen

Varios métodos de tratamiento convencionales han sido usados para depuración de las aguas residuales de diferentes procesos de fábricas de celulosa y papel. No obstante, previos estudios y aplicaciones han demostrado que los métodos convencionales no son en su totalidad capaces de cumplir con las normativas medioambientales que se hacen cada día más estrictas con respecto a la calidad de los efluentes y / o para que el agua se reutilice en el proceso (Shankar et al., 2014).

Ante la necesidad de optimizar tal proceso, la tecnología de separación mediante membranas ha atraído cada vez más atención como una forma alternativa y eficaz de tratar las aguas residuales de las fábricas de papel. Algunas plantas de nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF) y ósmosis inversa (RO) se han instalado en la industria papelera como tratamiento terciario a fin aumentar la calidad del efluente a verter o reutilizar. Entre las principales ventajas de la tecnología de separación por membranas se encuentran: bajo requerimiento energético, operación simplificada, reducción de la huella de carbono y pueden combinarse fácilmente con otros procesos de separación. Muchos informes científicos han demostrado la aplicabilidad de la tecnología por membrana a las aguas residuales de las fábricas de celulosa y papel (Pokhrel and Viraraghavan, 2004a). Además, la UF puede ser utilizada como un tratamiento terciario avanzado para eliminar sólidos suspendidos y, sustancias disueltas y coloidales (DCS) durante el tratamiento de efluentes de la industria papelera.

Sin embargo, el ensuciamiento de las membranas es un inconveniente importante que limita las aplicaciones de UF a gran escala, y en la actualidad esta tecnología de tratamiento solo se puede utilizar para filtrar efluentes de la industria papelera pre-tratados y que cumplan con los estándares de descarga (Puro et al., 2011b). Por lo tanto, a fin de minimizar el fenómeno de ensuciamiento de las membranas, es importante comprender el efecto de las condiciones de operación, de los mecanismos de ensuciamiento e investigar la composición química de sustancias contaminantes de las membranas.

El objetivo general de esta investigación se dividió en tres partes principales: *i)* describe cómo encontrar las condiciones óptimas de operación de cuatro parámetros de proceso: presión transmembrana (TMP), velocidad de flujo cruzado (CFV), temperatura y corte de peso molecular (MWCO) para maximizar el flujo promedio de permeado (\bar{J}_p) y rechazo de la demanda química de oxígeno (COD) y minimizar el

descenso del flujo de permeado acumulado (SFD) utilizando el método de Taguchi (Design Robusto) y utility concept aplicado a un proceso de UF a flujo cruzado en escala piloto, para remover DCS de efluentes tratados de la industria papelera (PMTE), *ii*) el descenso del flujo de permeado y los mecanismos de ensuciamiento (fouling) de las membranas de UF ensuciadas con PMTE se examinaron mediante modelos matemáticos semi-empíricos. Los resultados para los diferentes ensayos de UF se expresaron en términos de variación del flujo de permeado (J_p) en función del tiempo para verificar la precisión del ajuste (mayor valor de R^2 y menor valor de desviación estándar) de los distintos modelos de Hermia adaptados a flujo tangencial y del modelo de formación de torta en filtración a presión constante ajustados a los datos experimentales, y *iii*) describe métodos de identificación, caracterización y posibles orígenes de las sustancias contaminantes (foulants) en las membranas de UF. Técnicas como el análisis físico-química, FESEM, SEM-EDS, ATR-FTIR y 3DEEM se llevaron a cabo para comprender qué fracción de los contaminantes son responsables por la formación de incrustaciones sobre la superficie y adsorción dentro de los poros de las membranas.

Los resultados obtenidos durante la etapa de optimización de parámetros del procesos demostraron que TMP y MWCO tienen la mayor contribución en el \bar{J}_p y SFD. En el caso de la tasa de rechazo de COD, los resultados mostraron que MWCO tiene la mayor contribución seguida de CFV. Por consiguiente, las condiciones óptimas se encontraron para el segundo nivel de TMP (2.0 bar), el tercer nivel del CFV (1.041 m / s), el segundo nivel de la temperatura (15 °C) y el tercer nivel de MWCO (100 kDa). Bajo estas condiciones óptimas de operación \bar{J}_p , rechazo de COD y SFD alcanzaron respuestas de 81.15 L/m².h, 43.90% y 6.01 (alrededor de 28.96 % para \overline{FD}), respectivamente, valores dentro del rango previsto del intervalo de confianza del 95%.

Además, los modelos de Hermia adaptados a UF en flujo tangencial fueron capaces de predecir con gran precisión el descenso del J_p y los mecanismos de ensuciamiento en función del tiempo para todas las membranas seleccionadas (10, 30 y 100 kDa) y bajo diferentes condiciones ensayadas de UF. Por lo tanto, los modelos que presentan un mayor grado de ajuste son el bloqueo completo de poros (coeficiente de determinación $R^2 > 0.97$) y bloqueo intermedio ($R^2 > 0.96$), seguido por el modelo de formación de torta ($R^2 > 0.94$), lo que indica que éstos son los principales mecanismos de ensuciamiento de las membranas. Vale la pena mencionar que mediciones de la

distribución del tamaño de partícula y potencial zeta (cerca del punto isoeléctrico), confirman una reducción sustancial en los compuestos coloidales.

Análisis de 3DEEM revelaron que la mayoría de la materia orgánica fluorescentes en las membranas sucias eran proteínas coloidales (componentes similares a proteínas I + II) y proteínas macromoleculares (componentes similares a SMP). Además, polisacáridos (especie celulósica) y sustancias como ácidos grasos y resinosos fueron identificadas en las membranas contaminadas mediante análisis ATR-FTIR, tales sustancias desempeñan un papel importante en el ensuciamiento de las membranas. Por fin, análisis SEM-EDS para las membranas ensuciadas con PMTE se detectó concentración de contaminantes inorgánicos (iones metálicos multivalentes) especialmente el Ca^{2+} que podría acelerar la formación torta en la superficie de la membrana.