

USO DE LA TECNOLOGÍA DE NANOFILTRACIÓN A TRAVÉS DE MEMBRANAS PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA CERÁMICA

A. Deratani ⁽¹⁾, J. Palmeri ⁽²⁾, R. Moliner-Salvador ⁽³⁾, E. Sánchez ⁽³⁾

⁽¹⁾ Institut Européen des Membranes, UMR CNRS-ENSCM-Université Montpellier 2, 34095 Montpellier, France

⁽²⁾ Laboratoire de Physique Theorique, UMR CNRS-Université Paul Sabatier, 31062 Toulouse, France

⁽³⁾ Instituto de Tecnología Cerámica. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas. Universitat Jaume I. Castellón. Spain

RESUMEN

Este estudio ha sido emprendido con el fin acercar la nanofiltración a través de membranas poliméricas al tratamiento de las aguas residuales industriales de la industria cerámica, esperando obtener un agua con la suficiente calidad como para ser reutilizada en el propio proceso productivo o, alternativamente, poder verterla sin ningún problema para el medio receptor. Tomando como base la composición de varias muestras de agua residual del sector, el presente estudio se ha centrado inicialmente en la eliminación de la materia orgánica (reducción de la D.Q.O) y de los iones más representativos presentes en las aguas residuales, tales como Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-} .

En la primera parte del estudio, con vistas a optimizar la fase experimental, se ha realizado una simulación del proceso de nanofiltración usando el software Nanoflux. Entre otras cosas, la simulación permite seleccionar las membranas más apropiadas en función del caudal de permeado obtenido y en función del nivel de retención de la sustancia que se desea eliminar. En una segunda parte, se realizaron los ensayos experimentales en un sistema de laboratorio de filtración tangencial que trabaja con membranas planas.

En los experimentos realizados con varias aguas residuales y utilizando dos membranas de diferentes características, se ha encontrado que, bajo unas condiciones de trabajo determinadas y para una de las membranas utilizadas, la retención obtenida para las sustancias estudiadas es de aproximadamente el 90%. Todo ello, con un buen caudal de permeado y usando presiones de trabajo menores que las utilizadas en procesos de ósmosis inversa. Estos resultados demuestran la viabilidad de la tecnología estudiada y su potencial como tratamiento para mejorar la calidad de las aguas residuales de la industria cerámica.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión del agua se ha convertido en una cuestión cada vez más crítica en la mayoría de los sectores industriales tradicionales, debido a las grandes cantidades de aguas residuales que producen. En el caso de la industria de fabricación de baldosas cerámicas, la mayoría de las aguas residuales provienen de las operaciones de lavado de instalaciones usadas para la preparación y la aplicación de esmaltes y otros acabados. Además, se utiliza una cantidad considerable de agua de pozo para la preparación de los esmaltes y otras aplicaciones decorativas. Por tanto, como el agua es un recurso cada vez más limitado, la industria cerámica tiene que encontrar la solución para reducir su consumo. Una posibilidad es, por ejemplo, utilizar el agua residual después de un tratamiento adecuado en las operaciones de esmaltado.

La composición de las aguas residuales de la industria cerámica varía ampliamente y puede contener sólidos en suspensión y electrólitos de naturaleza muy diversa, así como sustancias orgánicas que provienen en su mayoría, de los aditivos utilizados en la decoración de los azulejos. Sin embargo, los tratamientos que se utilizan actualmente (tratamientos generalmente fisico-químicos) no son totalmente eficaces, en particular cuando se trata de: compuestos orgánicos que aumentan la DQO del agua, ciertos iones tales como cationes alcalinos y alcalino-térreos, compuestos de boro, cloruros, sulfatos, etc. Este tratamiento poco efectivo de las aguas residuales hace imposible su reutilización en algunas etapas del mismo proceso de producción y puede incluso impedir su vertido. Por tanto, esta agua necesita una gestión externa o un tratamiento adicional, que supone un alto coste económico y/o impacto ambiental.

La tecnología de membranas es un método avanzado de tratamiento de aguas. Se ha demostrado que los iones y las moléculas se pueden eliminar selectivamente de las aguas contaminadas usando este tipo de procesos.

En este trabajo se pretende hacer una evaluación preliminar del uso de la NF en las aguas residuales de la industria de fabricación de baldosas cerámicas, con el objetivo de eliminar la materia orgánica (reduciendo la DQO) así como las sales disueltas, para de este modo, favorecer y elevar la reutilización del agua tratada, en su propio proceso productivo. Los compuestos del boro no fueron incluidos en el estudio porque para su eliminación es necesario realizar un pretratamiento a las aguas residuales que los contienen. Una depuración eficiente tiene que disminuir la carga orgánica y las sales totales disueltas (STD) por debajo de ciertos límites que pueden estar sobre 50 mg O₂/l para la DQO y 500 mg/l para las STD. En principio, este objetivo se puede conseguir fácilmente usando una etapa de NF.

2. METODOLOGÍA

2.1. Tratamiento de aguas mediante membranas

Los procesos de separación por medio de membranas tienen las siguientes ventajas: son económicamente eficientes, se trata de procesos nada agresivos con el medio ambiente y se pueden considerar como tecnologías limpias ya que no necesitan productos químicos adicionales, su funcionamiento es relativamente sencillo y no son demasiado sensibles a variaciones en la composición del alimento y permiten conseguir un agua de elevada calidad.

Una membrana se puede definir como una barrera selectiva que separa dos fases. El transporte de las especies de una fase a otra está restringido de manera selectiva debido a las diferentes propiedades físicas y/o químicas que existen entre la membrana y las especies implicadas [1]. Los sólidos y los compuestos disueltos en la fase alimentación serán retenidos total o parcialmente en el retentado, mientras que el permeado será la fase libre de los compuestos retenidos. La forma, el tamaño y la carga de las diferentes especies son las características principales que determinarán si son retenidas por la membrana. El transporte a través de las membranas puede estar originado por distintas fuerzas impulsoras tales como la presión, un campo eléctrico o un gradiente de concentración, siendo los procesos cuya fuerza impulsora es la presión los más desarrollados en el caso del tratamiento del agua a través de membranas.

2.1.1. Clasificación de los procesos que utilizan membranas en el tratamiento de aguas

Según lo comentado anteriormente, la membrana actuará como un tamiz. Entonces, el transporte selectivo a través de la membrana está principalmente regido por la diferencia entre el tamaño de la especie disuelta y el de los poros de la membrana. La siguiente clasificación de los procesos que utilizan membranas se realizará teniendo en cuenta el tamaño del radio de poro (r_p): microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. (Fig 1)

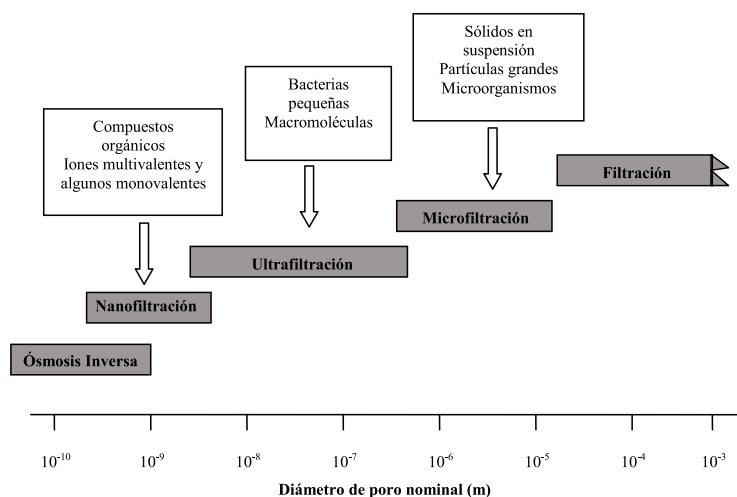


Figura 1. Clasificación de tratamientos mediante membranas

Las membranas de Microfiltración se caracterizan por tener un r_p que oscila entre 0.1 y 10 μm y una gran permeabilidad. En los procesos de MF la presión aplicada es baja (entre 0.2 y 1 bar) y las diferentes especies son retenidas por su tamaño. Por tanto, solamente las especies de tamaño mayor que el tamaño del poro de la membrana serán retenidas. Las membranas de MF retienen, principalmente, sólidos en suspensión, partículas grandes, coloides, y algunos microorganismos como las bacterias.

Las membranas de Ultrafiltración tienen un r_p inferior (entre 2 y 100 nm) y una permeabilidad mas baja que las membranas de MF. Por consiguiente los procesos de UF requerirán unas presiones de trabajo más elevadas (entre 0.5 y 5 bar) que en el caso de los procesos de MF. En este caso, también es la diferencia de tamaño el principal mecanismo implicado en la retención de las diferentes especies presentes en la corriente alimento. Estas membranas pueden retener pequeñas bacterias, virus y macromoléculas solubles tales como las proteínas.

El proceso de Nanofiltración (NF) es una técnica, intermedia entre la UF y la ósmosis inversa (OI), que ha sido más recientemente desarrollada. Las membranas de NF tienen un radio de poro menor de 2 nm. En este caso además del impedimento estérico, hay diferentes interacciones debidas al reducido tamaño del poro de las membranas. De este modo, el mecanismo del transporte se explica principalmente por efectos de tamaño y por efectos eléctricos (exclusión de Donnan), entre otros. Existe un equilibrio entre la superficie cargada de la membrana y la solución. Por esta razón muchas especies iónicas son rechazadas por la membrana, incluso especies de talla más pequeña que el r_p de la membrana.

Finalmente, las membranas de OI consisten en una barrera densa sin poros definidos. El mecanismo de transporte es diferente y se cree que tiene lugar según un mecanismo de disolución-difusión [2]. En este caso, la permeabilidad es mucho más baja que para las membranas anteriormente citadas. Por otra parte, las especies cargadas que están presentes en la corriente alimento son casi totalmente retenidas. Sin embargo, hay que destacar, que generalmente la OI requiere elevadas presiones de trabajo (hasta 70 bar).

2.1.2. Nanofiltración

Según lo visto en la Fig. 1, la NF es una técnica de la separación situada entre la OI y la UF. Inicialmente fue considerada como una OI pero hoy en día se considera una técnica diferente ya que, como se ha mencionado anteriormente, los mecanismos de transporte de ambas técnicas son distintos.

La NF se caracteriza principalmente por un mecanismo de transporte basado no solamente en los efectos de tamaño sino también en la carga de las diferentes especies, este hecho conlleva las siguientes implicaciones:

- Los compuestos neutros son retenidos por causa del impedimento estérico debido al tamaño del poro de la membrana.

- Una separación selectiva tiene lugar entre los iones polivalentes retenidos fácilmente y los iones monovalentes que son solamente parcialmente retenidos.
- Parte de las especies cargadas (especies monovalentes) pueden pasar a través de la membrana, esto hace que disminuya la presión osmótica.
- Las presiones de trabajo son más bajas (de 3 a 20 bar) que las utilizadas en la OI, además se obtiene un mayor caudal de permeado. Todo esto hace que la NF sea una técnica más eficiente energéticamente si se compara con la OI.

Esta técnica puede ser aplicada en muchos sectores, como pueden ser: la biotecnología y la industria alimentaria, la extracción y purificación de compuestos valiosos de bajo peso molecular, los tratamientos para la producción de agua potable, los tratamientos de aguas residuales y la protección del medio ambiente.

2.2. NanoFlux

NanoFlux [5,6] es un programa informático de simulación para modelizar el transporte de diferentes solutos en procesos de NF. Este programa puede ser utilizado para caracterizar las membranas de NF y también para predecir su comportamiento ante mezclas complejas de moléculas neutras y de iones. Este programa permite calcular, partiendo de datos de entrada estándares, todas las salidas necesarias en un proceso de NF (retención a los diferentes iones y moléculas neutras, flujos,...). Estos procesos pueden estar compuestos por un sólo elemento de filtración o pueden tratarse de plantas con diferentes módulos y etapas. Gracias a los algoritmos incorporados en el programa y a la base de datos interna de las principales membranas comerciales que NanoFlux contiene, es posible obtener resultados simulados rápidos y de confianza. Ese programa ha sido probado y validado usando casos reales [5-7]. Además, se realizan periódicamente actualizaciones y se introducen datos en la base de datos del programa para ponerlo al día y para poder seguir las evoluciones técnicas y del mercado. Por tanto, este programa de modelización es una poderosa herramienta que puede ser de gran ayuda a la hora de innovar y tomar decisiones que conciernen a un tratamiento de NF, sobre todo a la hora de elegir la mejor membrana y optimizar un proceso. Puede ser también utilizado para minimizar significativamente la dificultad y los costosos estudios a escala piloto, de este modo permite reducir el coste total y el tiempo necesario para elegir las membranas apropiadas, así como el tiempo necesario para obtener una planta de NF totalmente operativa.

El método que NanoFlux utiliza para la modelización consiste en estimar en primer lugar el tamaño del poro de la membrana según la retención de moléculas neutras modelo [5,6]. Posteriormente se llevará a cabo una etapa de caracterización para estudiar la retención que ofrece la membrana a diferentes sales simples (NaCl , MgSO_4 , Na_2SO_4 , CaCl_2). Los resultados experimentales obtenidos con estas sales 1:1, 2:2, 1:2, 2:1 ($|z_{\text{cation}}|, |z_{\text{anion}}|$) son analizadas por el programa NanoFlux a través de un procedimiento numérico de ajuste para determinar los valores óp-

timos de los dos parámetros (densidad de carga y espesor de la membrana) que caracterizan el par membrana/sal. Las predicciones teóricas de la retención de los iones presentes en una disolución son obtenidas tras resolver numéricamente las Ecuaciones Extendidas de Nerst-Plank para el flujo de iones "Hindered Transport". Los valores de los parámetros mejor ajustados, los cuales minimizan las diferencias entre las retenciones experimentales y teóricas, varían en función de la concentración de la sal y del pH de la corriente alimento. Este análisis nos permite crear la base de datos interna de NanoFlux. Por tanto, la densidad de carga y el espesor efectivo de la membrana para mezclas de sales son determinadas como una función del pH, de la fuerza iónica y de la concentración de la corriente alimento usando los datos de las sales simples disponibles en la base de datos interna combinados con una interpolación y un esquema ponderado. La retención y el flujo de permeado para mezclas multielectrolíticas complejas se pueden predecir de una forma aproximada utilizando la base de datos interna de las sales simples [5,6].

2.3. Método

2.3.1. Equipamiento

El esquema (Fig. 2) de la planta experimental utilizada es el siguiente:

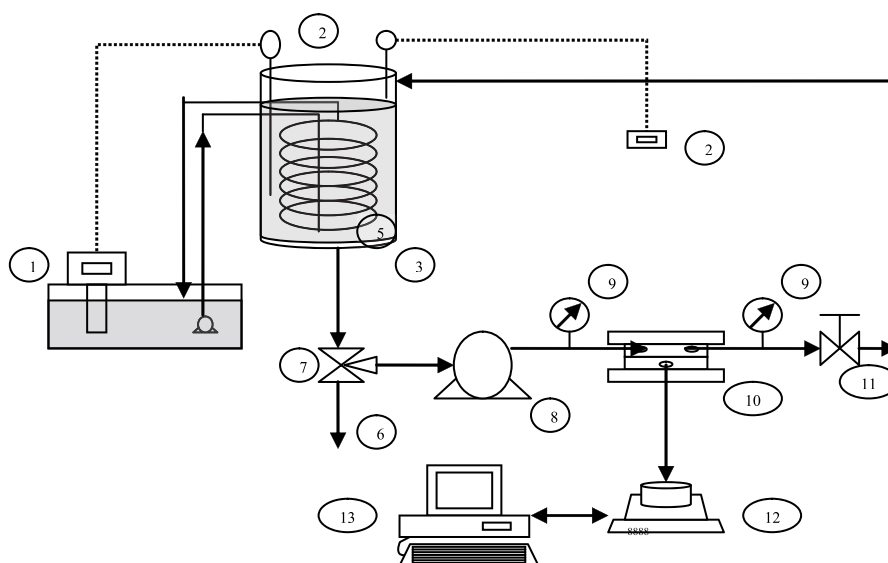


Figura 2. Diagrama del sistema piloto de NF.

La planta está constituida por una célula Sepa CF II labscale 316 SS (10) donde se ubicará la membrana, un tanque de alimentación (3) con un serpentín sumergido de acero inoxidable (5) y una bomba volumétrica (8) (bomba 231, flujo constante 9 l/min). El circuito cerrado donde circula la disolución alimento estará formada por tuberías que resisten temperaturas (más de 60 °C) y presiones (más de 20 bar) elevadas. La temperatura de los 30 l de disolución alimento se regulará por medio de un serpentín sumergido en el tanque de alimentación y que a su vez estará conectado a un baño termostático (1) (Frigitherm-10 P- Selecta). Se utiliza una sonda externa PT100 Prosensor (2) sumergida en el tanque de alimentación

para medir y controlar la temperatura de la disolución alimento. También se mide la temperatura del retentado cuando regresa al tanque de alimentación. La presión de la disolución alimento y del retentado, que puede ser modificada por la válvula (11), será medida por los manómetros situados a ambos lados de la célula (9). Se utilizará una balanza (12) (Sartorius CP323S) para medir la masa del permeado de forma continua y el flujo másico se registra en un ordenador a través de una salida RS232.

2.3.2. Membranas

En este estudio se han utilizado membranas de la marca DOW FILMTEC. Estas membranas son planas y su superficie efectiva es de 133 cm². Las especificaciones dadas por el fabricante para estas dos membranas se pueden ver en la tabla 1.

Membrana	Flujo de permeado (L/(h m ² bar))	Retención de MgSO ₄ (%)
NF-90	8,68	> 97
NF-200	5,99	97

Tabla 1. Especificaciones de las membranas de NF dadas por el fabricante

Nota:

- El flujo de permeado y la retención están basadas en las condiciones de trabajo siguientes: 2000 ppm MgSO₄, 25°C y 15 % recuperación.
- Los flujos de permeado para elementos individuales puede variar entre -15 %/+50 %

2.3.3. Proceso

El proceso experimental consiste en dos etapas diferentes:

- Predicción del comportamiento de la membrana de NF para las aguas residuales estudiadas (composición simplificada) usando Nanoflux. Esta etapa nos permite seleccionar la membrana y las condiciones de trabajo más apropiadas para la segunda parte.
- Validación experimental usando la membrana y las condiciones de trabajo obtenidas en la primera etapa para el tratamiento de aguas residuales reales.

El procedimiento experimental que se siguió durante los ensayos de las membranas está compuesto por las siguientes etapas:

- *Acondicionamiento de la Membrana:* Antes de usar membranas nuevas se ha de realizar un acondicionamiento para eliminar los conservantes y compactar la membrana. La membrana se coloca en la célula dispuesta para ello y se hace circular agua destilada a través del sistema durante 1 hora. La temperatura y la presión aplicadas (30 °C y 17.5 bar) fueron más elevadas que las aplicadas en condiciones normales de trabajo. Esta etapa sólo se realizará cuando la membrana se utiliza por primera vez.

- *Permeabilidad al agua pura:* después del acondicionamiento y después de cada ensayo, se calcula la permeabilidad al agua pura para asegurar la estabilidad y la integridad de la membrana. Estas medidas fueron realizadas usando agua destilada.
- *Medida del flujo y de la retención para varias aguas residuales (condiciones de trabajo fijas):* cuando se ha alcanzado la temperatura deseada, se inicia la circulación de la disolución alimento y la presión se incrementa poco a poco hasta conseguir la presión deseada. La disolución alimento circula a una velocidad tangencial constante (1,23 m/s), lo cual permite desestimar efectos de concentración de polarización en la superficie de la membrana. Después de aproximadamente 5 minutos de circulación, se asume que se alcanza el estado constante. Midiendo la masa de permeado se determina el flujo y después de esto se recoge una muestra para analizarla y calcular la retención. El permeado es reintroducido en el tanque de alimentación para que la concentración de la solución permanezca constante.
- *Cálculo de la retención:* las muestras recogidas en la anterior etapa son analizadas y los resultados son comparados con los análisis de las muestras de la disolución alimento. La retención se calcula de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$R = \left(1 - \frac{C^{\text{permeado}}}{C^{\text{alimento}}}\right) * 100$$

Donde C^{permeado} y C^{alimento} son la concentración del permeado y de la disolución alimento, respectivamente.

2.3.4. Análisis

La conductividad y el pH de las soluciones fueron determinadas usando un conductímetro JF 340 WTW y un pHmetro PHN 81 Tacussel, respectivamente. Los métodos y el equipamiento usados en el análisis de los diferentes parámetros y especies en las aguas residuales se reflejan en la tabla 2:

Parámetros	Método	Equipo
COD	UNE 77-004/89	-
B	Método de la Azometina-H por espectrofotometría de UV-VIS	UV-160A Shimadzu
SO ₄ ²⁻ y Cl ⁻	Cromatografía iónica	ICS-100 Dionex
Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ y Ca ²⁺	Espectrofotometría atómica de absorción UNE 77-056	1100B Perkin Elmer

Tabla 2. Métodos y equipos utilizados en los análisis de las aguas industriales

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Composición de las aguas residuales en la industria cerámica

Las aguas residuales pueden ser analizadas utilizando diferentes parámetros como el pH, la conductividad y la demanda química de oxígeno (DQO), estos dos últimos parámetros indican las sales totales disueltas (STD) y el contenido en materia orgánica, respectivamente. Las operaciones de limpieza normalmente realizadas a mano y la gran gama de productos son las causas de la amplia variación en la composición de las aguas residuales en la industria cerámica. La Tabla 3 muestra los principales valores que describen la composición de estas aguas residuales [8].

Parámetros	Intervalo de variación
pH	7-9
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2000-5000
Cloruros (mg/L)	100-1100
Sulfatos (mg/L)	100-1000
Calcio (mg/L)	50-500
Magnesio (mg/L)	10-100
Sodio (mg/L)	50-750
Boro (mg/L)	1-75
DQO($\text{mg O}_2/\text{L}$)	100-1300

Tabla 3. Composición de las aguas residuales de la industria cerámica

3.2. Predicción con NanoFlux

Como se ha dicho anteriormente el programa informático de simulación Nanoflux nos permite predecir el comportamiento de las membranas de NF frente a especies neutras y cargadas. Por este motivo, se eligieron soluciones modelo que contuviesen dos especies neutras de diferente tamaño molecular para imitar la retención de la materia orgánica de las aguas residuales. Como ejemplo, en la tabla 4 se pueden encontrar los datos de retención predichos por NanoFlux para dos especies neutras (etil alcohol y polietilenglicol (PEG 400)) usando dos membranas (NF-90 y NF-200). Los derivados de los PEG son compuestos utilizados en la industria cerámica en la etapa de decoración en su proceso de producción. En los resultados obtenidos Nanoflux predice que el PEG-400 es 100% retenido por ambas membranas, mientras que una molécula más pequeña como el etil alcohol es significativamente más retenida por la membrana NF-90.

Membrana	presión (bar)	Flujo (L/h·m ²)	Especie retenida	Masa molar (g/mol)	Retención (%)
NF-90	< 5	-	PEG-400	400	100
	5	23	Etil alcohol	46	80
NF-200	< 5	-	PEG-400	400	100
	5	25	Etil alcohol	46	62

Tabla 4. Predicción realizada por NanoFlux para las dos especies neutras (etil alcohol y PEG-400) con las membranas NF-90 y NF-200.

De la misma manera, puede obtenerse la predicción del comportamiento de la membrana frente a especies cargadas. A partir de la tabla 3, se puede considerar que una mezcla de aniones Cl^- y SO_4^{2-} y de cationes Na^+ y Mg^{2+} será una buena solución modelo simplificada que simule las aguas residuales estudiadas. La tabla 5 presenta los datos de la simulación obtenidos con las mismas membranas utilizadas anteriormente (NF-90 y NF-200) para una solución que contiene una mezcla equimolar del NaCl y de MgSO_4 con una concentración total de sal de 0.03M (2.69 g/l).

Membrana	Presión (bar)	Flujo (L/h·m ²)	Iones	Retención (%)
NF-90	5	23	Na^+	90
			Cl^-	87
			Mg^{2+}	97
			SO_4^{2-}	100
	11	60	Na^+	90
			Cl^-	90
			Mg^{2+}	100
			SO_4^{2-}	100
NF-200	5	27	Na^+	47
			Cl^-	60
			Mg^{2+}	85
			SO_4^{2-}	98
	11	75	Na^+	72
			Cl^-	65
			Mg^{2+}	94
			SO_4^{2-}	100

Tabla 5. Predicción obtenida con NanoFlux para una mezcla equimolar del NaCl y de MgSO_4 con una concentración total de sal de 0.03M (2.69 g/l)

Una vez más la membrana NF-90 muestra un mejor comportamiento en la retención de los iones considerados, incluso utilizando presiones de operación bajas (5 bar) y con un flujo de permeado similar. Por tanto se decidió que para validar

la simulación y realizar la filtración de las aguas residuales reales se utilizaría la membrana NF-90.

3.2. Resultados con las aguas residuales reales de la industria cerámica

El tratamiento de NF se llevó a cabo a baja presión con varias muestras tomadas después de una depuración físico-química en dos compañías diferentes. Las condiciones de operación para ambas muestras se reflejan en la tabla 6.

Muestras	presión (bar)	Temperatura (°C)	Flujo (L/(h m ² bar))
Agua residual 1	5	25	2,27
Agua residual 2	4	25	3,45

Tabla 6. Condiciones de operación usadas en los ensayos con las muestras de aguas

La tabla 7 recopila los valores de los parámetros obtenidos para las dos muestras estudiadas antes y después del tratamiento de NF con la membrana NF-90. Como se había previsto, los iones divalentes (SO_4^{2-} , Mg^{2+} y Ca^{2+}) son retenidos casi al 100% durante el tratamiento de NF. Por otra parte, los iones monovalentes (Cl^- , Na^+ y K^+) son retenidos cerca de un 90% por la membrana NF-90 tal y como también predijo el software de simulación. En cuanto al parámetro DQO, se puede observar que la NF permite reducir de manera eficiente la contaminación orgánica puesto que se obtienen valores de este parámetro menores de 50 mg O_2/l .

Parámetros analizados	Agua residual 1			Agua residual 2		
	Después del tratamiento físico-químico	Después del tratamiento de NF con NF90/5 bar		Después del tratamiento físico-químico	Después del tratamiento de NF con NF90/4 bar	
	Análisis	Análisis	Retención	Análisis	Análisis	Retención
pH	8,35	7,44	-	7,95	7,03	-
Conductividad (mS/cm)	3,5	0,16	95%	2,33	0,17	93%
B (mg/l)	5,9	3,9	34%	3,6	2,8	22%
SO_4^{2-} (mg/l)	258	< 10	>96%	304	<10	>97%
Cl^- (mg/l)	932	36	96%	619	41	93%
Na^+ (mg/l)	555	28,4	95%	304	30,4	90%
K^+ (mg/l)	16,8	0,9	95%	18,8	2,1	89%
Mg^{2+} (mg/l)	28	0,3	99%	24,8	0,3	99%
Ca^{2+} (mg/l)	75	<0.1	>99%	101	<0.1	>99%
COD (mg/l)	1156	44	96%	129	< 30	> 77%

Tabla 7. Datos obtenidos con las aguas residuales después de la membrana NF-90

Finalmente, hay que tener en cuenta que estos resultados han sido obtenidos sólo utilizando la predicción de NanoFlux y sin una optimización experimental del proceso.

4. CONCLUSIONES

Los procesos avanzados basados en técnicas de separación mediante membranas pueden ser utilizados por la industria cerámica para mejorar la gestión de sus aguas residuales. Esta mejora puede permitir a las compañías una mayor reutilización del agua residual tratada dando lugar a importantes ahorros económicos y reduciendo el impacto ambiental.

Los resultados experimentales obtenidos en este estudio demuestran que la NF puede ser una buena técnica de purificación de las aguas residuales de la industria cerámica porque se alcanzan reducciones muy significativas en las sales disueltas totales (STD) y en la DQO (valores de retención cercanos al 90%). Por otra parte, estos resultados también prueban que NanoFlux es una buena herramienta de predicción que puede ahorrar tiempo y dinero en estudios experimentales, ya que las predicciones hechas por el programa se aproximan bastante a los resultados obtenidos experimentalmente.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido posible realizarlo gracias al Instituto Valenciano de las Pequeñas y Medianas Empresas (IMPIVA) de la Comunidad Valenciana (España) y al Programa Eureka (Proyectos IMAETA/2005/11, IMIDIE/2009/3 y Σ!4121).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MULDER, M. Basic principles of membrana technology, 2nd Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996
- [2] Van der BRUGGEN, B.; VANDECASTEELE, C.; Van GESTEL, T.; DOYEN, W. ; R. LEYSEN, R. A review of pressure-driven membrana processes in wastewater treatment and drinking water production, *Environmental Progress*, 22(1), 46-56, 2003.
- [3] BAKER, R. W. *Membrana technology and applications*, 2nd. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 2004.
- [4] GUIZARD, C. *Guide de la Nanofiltration*. Montpellier : Club Français des Membranes, 2000.
- [5] PALMERI, J.; SANDEAUX, J.; SANDEAUX, R. et al. Modeling of multi-electrolyte transport in charged ceramic and organic nanofilters using the computer simulation program NANOFLUX. *Desalination*, 147, 231- 236, 2002.
- [6] LEFEBVRE, X.; PALMERI, J.; SANDEAUX, J., et al. Nanofiltration Modeling: a comparative study of the salt filtration performance of charged ceramic and organic membranas using the computer simulation program NANOFLUX. *Separation and Purification Technology*, 32, 117-126, 2003.

- [7] LEFEBVRE, X.; PALMERI, J.; DAVID, P. Nanofiltration theory: an analytic approach for single salts, *J. Phys. Chem. B*, 108, 16811-16824, 2004.
- [8] BLASCO, A. et al. Tratamiento de emisiones gaseosas, efluentes líquidos y residuos sólidos de la industria cerámica. Castellón: Ed. AICE-ITC.