

Causas de y Curas para el Ensuciamiento de Membranas

Por Peter S. Cartwright

El ensuciamiento es el factor más significativo que afecta el rendimiento de los sistemas de procesamiento por membrana, causando una reducción en la calidad y el flujo del agua de producto.

Las tecnologías de procesamiento por membrana de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa se utilizan ampliamente para separar materiales suspendidos y disueltos de soluciones de agua en numerosas aplicaciones industriales, médicas y de agua potable.

Generalmente, la microfiltración (MF) involucra la eliminación de partículas que varían en tamaño de 0.1 a 1.0 micras (1000 a 10,000 angstroms), la ultrafiltración (UF) es utilizada para separar materiales en el rango de 0.001 a 0.1 micras (10 a 1000 angstroms), y la nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) son utilizadas para separaciones que involucran materiales menores de 0.001 micras (10 angstroms) en tamaño. La microfiltración es principalmente utilizada para la remoción de materiales suspendidos o coloidales. La ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa son utilizadas para la separación de materiales disueltos (soluto).

La tecnología de filtración convencional involucra el bombeo de toda la corriente líquida a través del material de filtro. Esto se conoce como "filtración sin salida". Una tecnología reciente conocida como filtración de "flujo cruzado" o "flujo tangencial" permite el procesamiento continuo de las corrientes líquidas. En este proceso, la solución completa fluye por encima de y paralela a la superficie del filtro, y debido a que este filtro se encuentra presurizado (desde la bomba), el agua es forzada a través del filtro. El flujo turbulento de la solución completa sobre la superficie minimiza la acumulación de partículas en el filtro y facilita la operación continua del sistema. La Figura 1 ilustra esta tecnología comparada con la filtración convencional.

El factor más significativo que afecta el rendimiento de los sistemas de procesamiento por membrana es el ensuciamiento de la membrana. Esto es el resultado de materiales

insolubles que cubren la superficie de la membrana y causan una reducción en la calidad y/o el caudal del agua de producto. Este artículo aborda los tipos específicos de materiales que ensucian, las causas de dicho ensuciamiento, normas de diseño del sistema para minimizar el ensuciamiento y procedimientos de limpieza para eliminar los materiales que ensucian.

Materiales que Ensucian

En general, la mayoría de materiales que ensucian pueden ser clasificados de la manera siguiente:

- Sólidos suspendidos
- Escamas
- Material coloidal
- Óxidos de metal
- Aceite/grasa
- Materiales biológicos

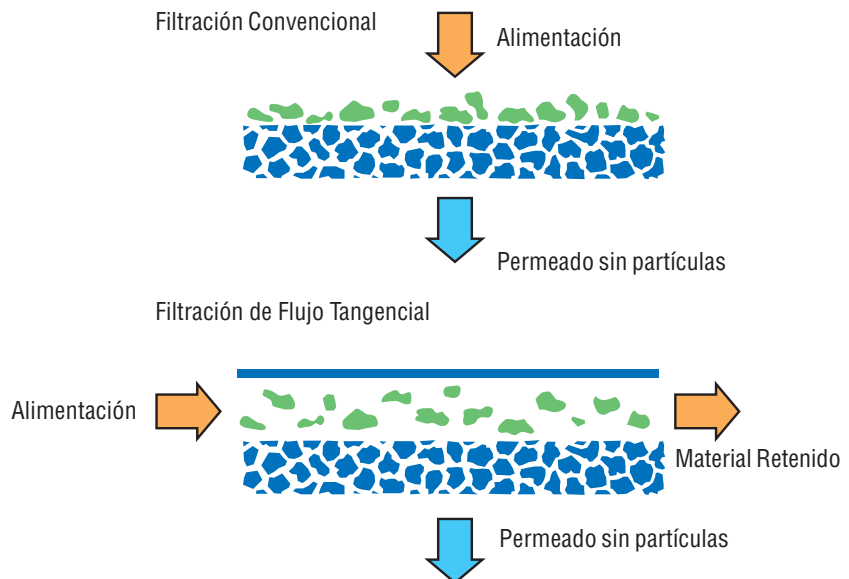
El ensuciamiento a través de **sólidos suspendidos** es el resultado de una acumulación de partículas en la superficie de la membrana. Las partículas ingresan al sistema de la membrana a través del agua de alimentación y, debido a la filtración inadecuada o al diseño inadecuado del sistema (o ambos),

se depositan sobre la superficie de la membrana. **La formación** de escamas es el resultado de la precipitación de ciertas sales diversamente solubles, cuyos límites de solubilidad son excedidos durante el proceso de concentración del sistema de membranas. Éstas incluyen el carbonato de calcio, sulfato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio y fluoruro de calcio. Con las tecnologías de membrana, este fenómeno solamente ocurre en los sistemas de ósmosis inversa donde hay materiales iónicos concentrados.

Los **materiales coloidales** son sólidos suspendidos tan pequeños que normalmente no se separan de la solución. Además tienen carga negativa y, por lo tanto, resisten la aglomeración ("agrupamiento"). La concentración causada por el procesamiento de la membrana puede resultar en que los materiales coloidales se depositen en la superficie de la membrana. Los coloides tienden a aglomerarse y precipitarse al ser forzados a juntarse.

La deposición de **óxido de metal** ocurre comúnmente en forma de hierro, aluminio y, en un menor grado, manganeso. El hidróxido de hierro insoluble puede ser el resultado de hierro coloidal, oxidación de hierro ferroso en

Figura 1. Flujo Tangencial (Cruzado) vs. Filtración Convencional



la corriente de alimentación, productos de la corrosión del hierro en el agua de alimentación, o de componentes del mismo sistema. El hidróxido de aluminio tiene una solubilidad mínima a un pH de 6.6, y ocurre a menudo en suministros de agua como resultado de la adición de sulfato de aluminio que es añadido por la planta de tratamiento municipal. El hidróxido de manganeso se encuentra a menudo en cantidades muy pequeñas en suministros de agua de alimentación.

Los contaminantes de **aceite y grasa** son sustancias que son insolubles en agua pero solubles en solvente TF de hexano, cloroformo o freón. Estos contaminantes se encuentran a menudo en el agua como emulsión; ciertos materiales que son activos en la superficie reaccionan con el aceite o la grasa para formar gotitas de tamaño de coloides que son típicamente muy estables en el agua.

Los materiales de aceite/grasa que ensucian resultan como consecuencia del cubrimiento de la superficie de la membrana con estos materiales. A menudo la permeabilidad selectiva de ultrafiltración y de membranas de OI “rompe” la emulsión aceite/agua y el aceite libre que resulta es atraído hacia la superficie de la membrana.

El ensuciamiento **biológico** es el resultado de microorganismos que literalmente crecen en la superficie de la membrana y forman una “biocapa” o “biopelícula”. Las biocapas son capas discretas formadas por microorganismos como resultado de su actividad metabólica. La capa del polímero es una matriz de glicocalix, un material capsular de polisacáridos extracelulares que se forma durante el crecimiento y la reproducción de microorganismos. Esta matriz se pega a una superficie y los microorganismos se colonizan en la biocapa.

Además de servir como estructuras para estabilizar las colonias, las biocapas protegen de los desinfectantes a los microorganismos y también los protegen de ser eliminados por el agua en movimiento. Además ayudan a capturar alimento de la corriente. Con los sistemas de membrana, el crecimiento de la biocapa crea una capa que atrapa las sales y previene que el flujo turbulento mezcle totalmente los solutos en la corriente de alimentación.

Causas de Ensuciamiento

Debido a que todos los procesos de membrana (MF, UF, NF y OI) involucran la separación de contaminantes de una solución por la acción del bombeo continuo de agua a través de una membrana, la concentración resultante de contaminantes aumenta las

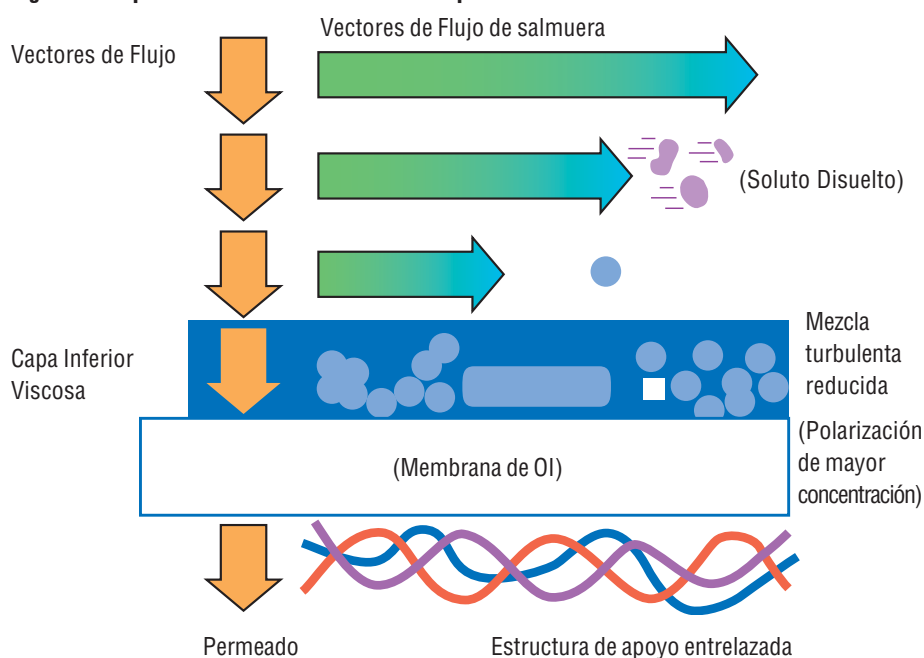
probabilidades de que estos contaminantes cubran la superficie de la membrana. Aunque el principio de filtración por flujo tangencial está basado en el movimiento de la corriente de alimentación sobre la superficie de la membrana a velocidades lo suficientemente altas como para evitar que los materiales insolubles se depositen, en la vida real el ensuciamiento puede ocurrir, y de hecho ocurre — de manera demasiado frecuente. Cuando los contaminantes cubren la superficie de la membrana, éstos tienden a tapan los poros, de tal manera que reducen el caudal del agua de producto que pasa a través de la membrana. Asimismo ocurre otro fenómeno conocido como “polarización de la concentración.” Mientras se acumula la capa que ensucia a la membrana, los materiales disueltos quedan atrapados en la capa y no pueden dispersarse fácilmente de vuelta a la corriente de alimentación. Mientras aumenta su concentración, se hacen insolubles o de hecho pasan en su mayoría a través de la membrana. El resultado neto es una calidad degradada del agua de producto como resultado directo de la capa de ensuciamiento.

La Figura 2 ilustra esta capa de ensuciamiento y, a pesar de que el material particular que causa el ensuciamiento es una bacteria, cualquiera de los materiales descritos anteriormente puede producir una capa de ensuciamiento y causar la polarización de la concentración.

Prevención del Ensuciamiento

Diseño del Sistema

Figura 2. Capa de Ensuciamiento sobre la Superficie de una Membrana



Debido a que cada tipo de material que ensucia tiene sus propias características particulares, ninguna característica en particular del diseño del sistema reducirá el potencial para todos los tipos de ensuciamiento. Sin embargo, en general, mantener la “recuperación” del sistema a un nivel relativamente bajo ayudará a minimizar el ensuciamiento. “Recuperación” se define como aquel porcentaje de la corriente de alimentación que pasa a través de la membrana y sale como agua de producto.

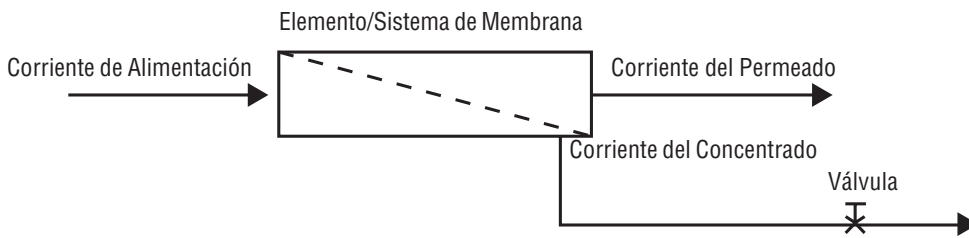
Obviamente, mientras más alto sea el porcentaje de agua de alimentación que es forzado a través de la membrana, mayor será el peligro de que los materiales suspendidos o aquellos contaminantes que se hagan insolubles a mayores concentraciones ensucien la superficie de la membrana.

La Figura 3 ilustra el diseño de un sistema de membrana e identifica cada corriente en términos del caudal y concentración del contaminante. Nótese la definición de recuperación.

Pretratamiento

Para cada tipo de material que ensucia, la forma óptima de pretratamiento puede ser diferente, por lo que es extremadamente importante que el agua de alimentación sea analizada completamente para identificar los principales candidatos que puedan estar causando el ensuciamiento. En muchos casos se recomienda hacer pruebas en el sitio para optimizar las tecnologías de pretratamiento. Más adelante se presenta una lista de tecnologías genéricas de pretratamiento apropiadas para varias categorías de materiales que ensucian.

Figura 3. Diagrama del Sistema de la Membrana



QF – Caudal de Alimentación

CF – Concentración del Solute en el Agua de Alimentación

QP – Caudal del Permeado

CP – Concentración del Solute en el Permeado

QC – Caudal del Concentrado

CC – Concentración del Solute en el Concentrado

$$\text{Recuperación} = \frac{QP}{QC}$$

(Expresado como un Porcentaje)

Limpieza

Debido a que la Ley de Murphy siempre prevalece y ninguna cantidad de pretratamiento eliminará por completo el ensuciamiento, en cierto momento la limpieza llegará a ser necesaria. Como regla general, el momento de limpiar la membrana será cuando ocurra una reducción del 10 por ciento ya sea en el caudal del agua de producto o en la calidad del agua. Como resultado de la polarización de concentración con membranas de NF u OI, una disminución en la calidad del agua de producto podría señalar el inicio del ensuciamiento antes de una disminución en el caudal del permeado. Como procedimiento provisional, se puede reducir temporalmente la presión trasera en el sistema para aumentar la velocidad del caudal de alimentación sobre la superficie para poder separar los materiales que causan el ensuciamiento, removiéndolos de la superficie de la membrana. La mayoría de los sistemas grandes de OI vienen equipados con unidades automáticas que logran hacer esto a una frecuencia previamente establecida, por ejemplo una vez al día durante diez minutos.

Un sistema bien diseñado de procesamiento por membrana incluye un sistema de "limpieza-en-el-lugar" (CIP) para llevar a cabo esta limpieza. Un tanque de solución de limpieza viene equipado con una bomba para dirigir el limpiador hacia el sistema de la membrana. Los caudales de permeado y concentrado son regresados al tanque de almacenamiento del sistema de limpieza para lograr la recirculación de la solución de limpieza. Dependiendo de la naturaleza del material que causa el ensuciamiento y el tipo de limpiador utilizado, la solución puede ser calentada y la membrana expuesta a altas velocidades, mojado, etc. Además, la solución

de limpieza puede ser usada nuevamente varias veces antes de tirarla.

Los tipos de productos químicos para limpieza que se encuentran disponibles son tan variados como lo son los tipos de materiales que ensucian la membrana. Enseguida se presentan ejemplos de varios sistemas químicos usados para eliminar materiales específicos que causan ensuciamiento.

La eliminación de escamas se logra a menudo a través de la limpieza con un ácido orgánico, por ejemplo ácido cítrico o ácido sulfámico. Los productos químicos quelantes tales como EDTA ayudan en la remoción de escamas. Los ácidos minerales tales como el ácido hidrocórico (HCl) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄) son muy efectivos, pero es peligroso manipularlos y pueden atacar ciertos polímeros de la membrana.

Los materiales coloidales que causan ensuciamiento pueden ser eliminados con agentes quelantes o dispersantes, a menudo en combinación con surfactantes. Los óxidos de metal reaccionan favorablemente con los limpiadores ácidos y agentes quelantes. Las biocapas son eliminadas de manera más efectiva con enzimas, a menudo acompañadas por agentes quelantes.

Los materiales de aceite/grasa que causan ensuciamiento pueden ser disueltos con soluciones alcalinas que contienen surfactantes y agentes emulsificantes tales como el sulfato laurílico de sodio. Las soluciones alcalinas fuertes pueden hidrolizar los polímeros de membrana celulósica.

Resumen

Un aumento en las aplicaciones de la tecnología de proceso por membrana a nuevas áreas de purificación del agua, tratamiento de

residuos, y proceso de alimentos y sustancias químicas ha presentado nuevos retos con respecto al diseño y la operación de estos sistemas para minimizar el potencial de ensuciamiento. Es crítico poder entender la naturaleza de los materiales que ensucian al igual que los efectos del diseño del sistema y los esquemas de limpieza. Además, se recomiendan las pruebas para optimizar los sistemas y procedimientos de limpieza química para cada nueva aplicación. □

Materiales que ensucian

Sólidos suspendidos

Formación de escamas

Materiales coloidales

Metales

Materiales biológicos

Aceite/grasa

Pretratamiento Recomendado

Filtración, tal como filtros de distintos materiales seguidos por filtros de cartucho de 5 micras.

Ajuste del Suavizador y/o pH, adición de dispersante.

Coagulación seguida por filtración.

Oxidación seguida por filtración, adición de dispersante.

Adición de desinfectante (tal como cloro u ozono) seguida por filtración.

Separación aceite/grasa, coagulación seguida por filtración.

Acerca del Autor

El Ing. Peter S. Cartwright, presidente de Cartwright Consulting Co., Minneapolis, es un ingeniero profesional con licencia para ejercer en varios estados. Ha estado involucrado en la industria de tratamiento de agua desde 1974 y ha publicado más de 100 documentos y artículos sobre temas relacionados. El Ing. Cartwright ha presidido varios comités y equipos de trabajo de la WQA y recibió el Premio al Mérito de dicha organización. Como miembro del Comité de Revisión Técnica de WC&P desde 1996, sus conocimientos incluyen procesos de separación de alta tecnología tales como ósmosis inversa, ultrafiltración, microfiltración, electrodiálisis, desionización, adsorción de carbón, ozonación y destilación. Contacto: (952) 854-4911, (952) 854-6964 (fax), correo electrónico: CartwrightConsul@cs.com o sitio web: www.cartwright-consulting.com