

## **ANEJO A. MEMBRANAS (ULTRAFILTRACIÓN)**





# SUMARIO

<b>A.1. MEMBRANAS (ULTRAFILTRACIÓN)</b>	<b>5</b>
A.1.1. Historia y generalidades	5
A.1.1.1. Generalidades	5
A.1.1.2. Tipos de separación con membranas	6
A.1.1.3. Modelos teóricos de funcionamiento de las membranas	8
A.1.1.4. Naturaleza y tipos de membranas	11
A.1.1.5. Ensuciamiento de las membranas	13
A.1.1.6. Aplicaciones industriales de las membranas	15
A.1.2. Membrane Bioreactor (MBR) System	17
A.1.3. Características y ventajas del MBR	18
A.1.3.1. Experiencia	18
A.1.3.2. Calidad del efluente y potencial de reutilización	19
A.1.3.3. Plantas compactas	20
A.1.3.4. Expansibilidad	21
A.1.3.5. Operación simple	21
A.1.3.6. Fiabilidad del proceso	22
A.1.3.7. Resistencia al ensuciamiento	22
A.1.3.8. Durabilidad excepcional de la membrana	22
A.1.4. parámetros de diseño del sistema propuesto	23
A.1.4.1. Caudal de diseño	23
A.1.4.2. Parámetros físicos	23
A.1.4.3. Diseño preliminar del proceso	24
A.1.4.4. Carretes de membranas de ultrafiltración	25
A.1.4.5. Descripción del funcionamiento	26





## A.1. MEMBRANAS (ULTRAFILTRACIÓN)

### A.1.1. Historia y generalidades

#### A.1.1.1. Generalidades

Las membranas semipermeables ya se utilizaron en el siglo XIX en el riñón artificial, por lo tanto lo justo no es hablar de una nueva tecnología, sino más bien de nuevas aplicaciones y desarrollo de nuevos materiales dentro de la tecnología de membranas.

Una membrana es una lámina que permite el paso selectivo de sustancias a su través. El flujo de estas sustancias puede venir determinada por diferentes "fuerzas impulsoras", principalmente: la presión, concentración y potencial eléctrico. La selectividad permitirá enriquecer o empobrecer una corriente o carga en una o varias sustancias,

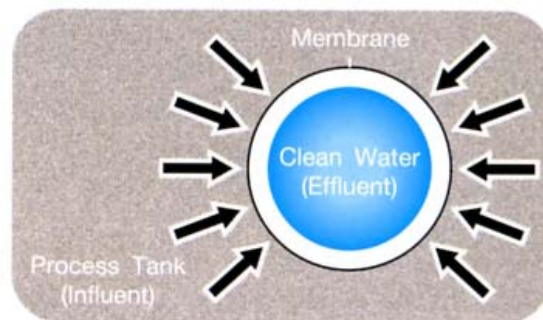


Fig.A.1.1.1.1 Diagrama básico de un proceso de separación de membranas

El alimento se introduce en un módulo donde existe una membrana. De este módulo emergen dos corrientes: el rechazado, que contendrá las sustancias que no han logrado pasar a través de la membrana y el permeado que contendrá las sustancias que sí pueden pasar a través de la membrana. La Fig. A.1.1.1.1 muestra un esquema simplificado.

La selectividad de una membrana frente a una sustancia puede venir dada por dos factores distintos dependiendo de cómo describamos la membrana:

- Tamaño: La membrana consta de poros, las sustancias más grandes que el tamaño de estos poros no podrán pasar a su través.
- Afinidad química: Si una sustancia se incorpora fácilmente a la membrana podrá atravesarla, en caso contrario no.



El flujo de una sustancia a través de una membrana se lleva a cabo porque existe una "fuerza impulsora", es decir, algo que mantiene al sistema apartado del equilibrio (p. ej. un gradiente de presiones que hace que el fluido se mueva de mayor a menor presión). El flujo intenta compensar este desequilibrio y en último término es misión del diseñador mantener este desequilibrio para mantener el flujo. Ello no obstante tiene unos límites marcados por la 3a ley de Onsager que de forma simplificada podría enunciarse como: "Cuanta más densidad de flujo exista a través de una membrana peor es la eficiencia energética del proceso" [1].

### A.1.1.2. Tipos de separación con membranas

Atendiendo a la naturaleza de las fuerzas impulsoras podemos dividir los procesos de membranas según la Tabla A.1.1.2.1 [1]:

<i>Fuerza impulsora</i>	<i>Factor de separación</i>	<i>Operación</i>
Presión	Tamaño	Filtración
presión y concentración	difusividad o tamaño	osmosis inversa
campo eléctrico	Carga	Electrodiálisis
Concentración	carga o tamaño	Diálisis
Otras	difusividad y solubilidad	pervaporación y transporte activo

Tabla.A.1.1.2.1 Calsificación de procesos con membranas

El principio de la filtración a nivel de membranas es totalmente equivalente al de una filtración "normal" con mallas. Las sustancias con un tamaño superior al de los poros no pasan al permeado y las más pequeñas sí. Dependiendo del tamaño las operaciones de filtración se dividen en microfiltración y ultrafiltración, hablando algunos autores también de nanofiltración. La delimitación de tamaños en la clasificación no es totalmente discreta, y los problemas de diseño y ecuaciones descriptivas son equivalentes en todos los casos.

La osmosis inversa es quizá el proceso más popular y se aplica sobre todo a la obtención de agua dulce a partir de agua salada. Normalmente se lleva a cabo en membranas no porosas y el principio consiste en ejercer presión por el lado de rechazado de modo que el agua pase



a través de la membrana desde el rechazado al permeado, invirtiendo el flujo del proceso natural (osmosis espontánea promovida por la presión osmótica). El requerimiento es que la membrana sea compatible con el agua y no deje permear a su través la sal.

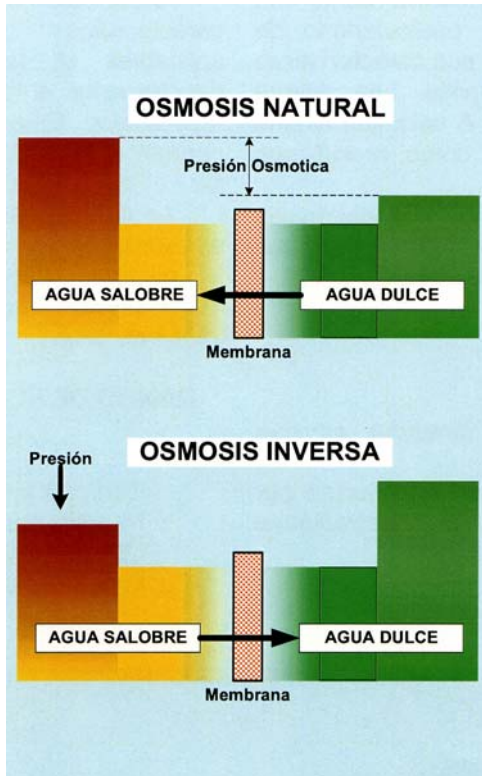


Fig.A.1.1.2.1 Diagrama básico de separación por osmosis

La Tabla A.1.1.2.2 muestra una clasificación general de los procesos arriba descritos, promovidos por la presión y por el efecto conjunto presión/concentración, según las propiedades de las membranas utilizadas, especialmente del tamaño de poro [8].

Además de estos procesos, se emplean otros que están promovidos por fuerzas impulsoras distintas de la presión:

La electrodiálisis se usa para separar iones de un medio líquido. Para ello se aplica un potencial eléctrico que arrastrará los iones desde el permeado al concentrado. Las membranas utilizadas son resinas de intercambio iónico, y la fuerza impulsora es un campo eléctrico.



La diálisis viene a ser una operación contraria a la de la osmosis inversa, en que se eliminan los solutos del rechazado poniendo en contacto éste con un permeado menos concentrado, siendo precisamente el gradiente de concentración el promotor del proceso.

La pervaporación aprovecha la compatibilidad química de un líquido con la membrana de modo que éste se disuelva en ella. Manteniendo una presión baja en el permeado, el soluto se vaporizará en la membrana y pasará al permeado.

El transporte activo es un mecanismo complejo, de hecho es como funcionan las membranas celulares. Utiliza enzimas capaces de captar un soluto en el lado más concentrado de la membrana y estos enzimas liberan la sustancia en el lado menos concentrado. A nivel ingenieril esto se consigue empleando sustancias formadoras de complejos, en vez de enzimas [1].

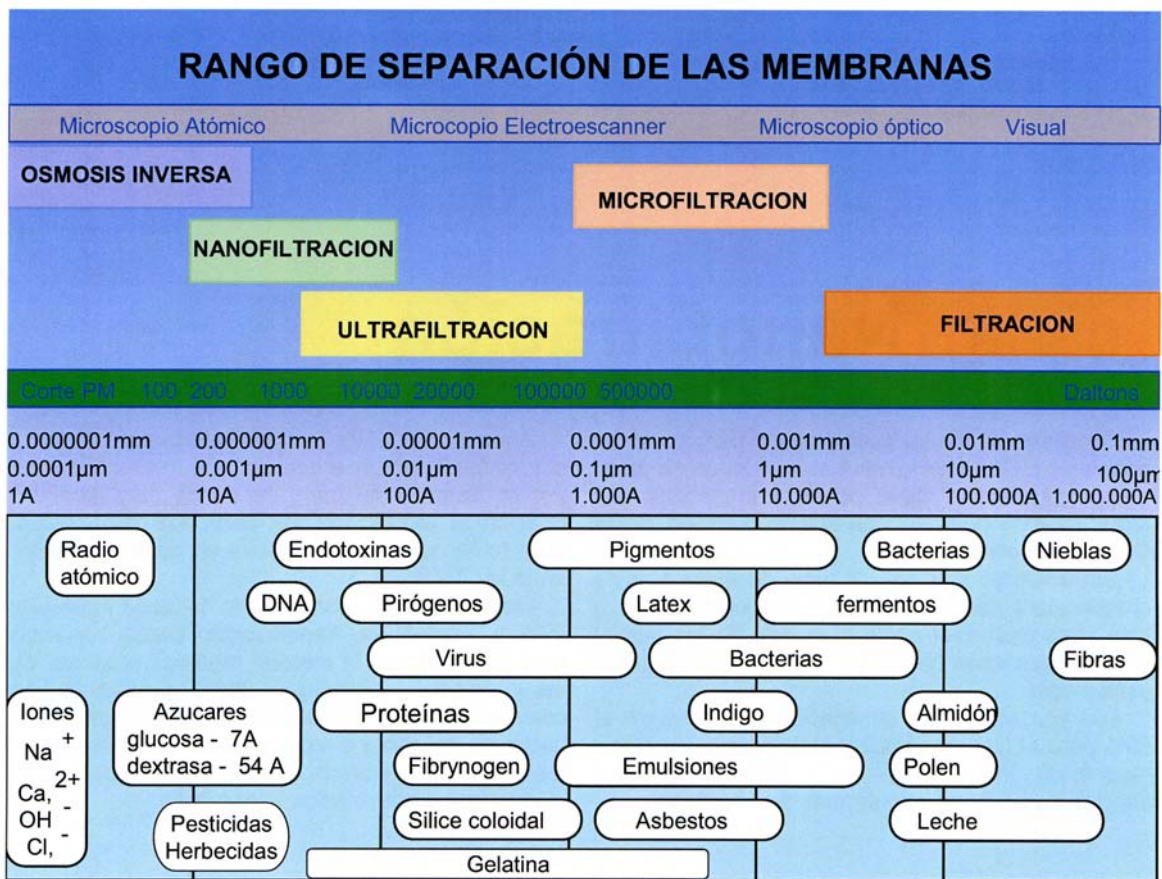


Tabla.A.1.1.2.2 Correlación de propiedades de membranas con rangos de separación

**A.1.1.3. M**



### odelos teóricos de funcionamiento de las membranas

El tipo de las ecuaciones que se manejan pretenden relacionar el flujo de una sustancia cualquiera a partir de la membrana con diversos parámetros. Para cada tipo de separación (ultrafiltración, osmosis...) existen problemas específicos. Sin embargo, hay una serie de ecuaciones comunes a todos los procesos de transferencia con membranas, que son las que se mencionan en este punto.

En general se manejan dos grandes modelos: El modelo de poros, que considera que las membranas son porosas, es decir, que las sustancias pasan a través de la membrana infiltrándose a través de los poros de la misma y el modelo de absorción-difusión que describe la transferencia en función de la "afinidad" que tengan las moléculas por el material de la membrana, no considerando explícitamente la porosidad de la membrana, sino que la trata como si fuera un material homogéneo. Convendrá usar un modelo u otro según cuál sea el modelo que permita explicar lo más sencillamente posible el fenómeno experimental observado. Por ejemplo, si en una operación de ultrafiltración se observa que en el permeado aparecen proteínas pequeñas pero no aparecen proteínas grandes el modelo de poros parece ser el satisfactorio. Si en una operación de pervaporación con agua y acetona observamos que en el permeado aparece acetona (que posee un tamaño molecular superior al del agua) y no aparece agua, parece más lógico recurrir al modelo de solubilidad-difusión [1].

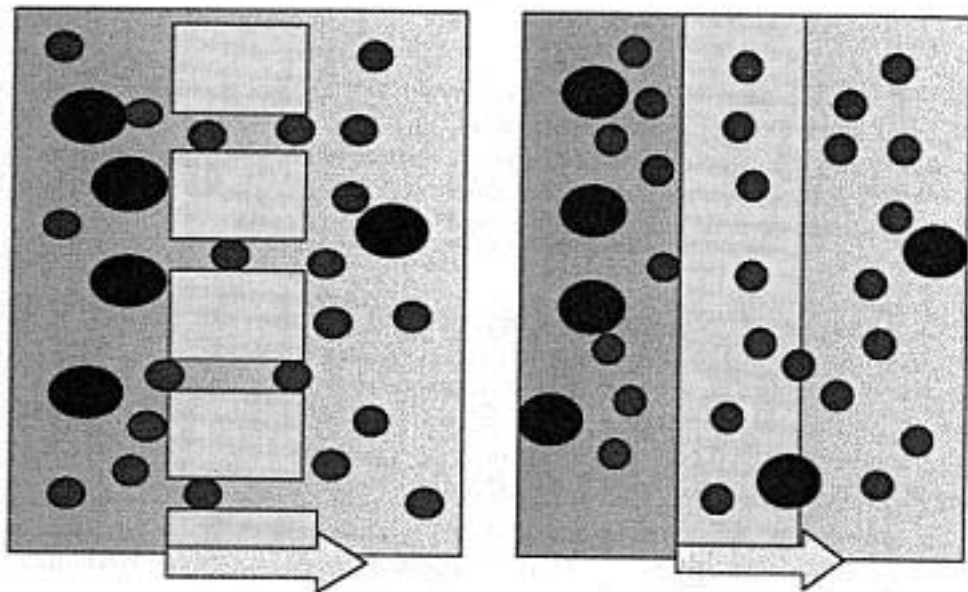


Fig.A.1.1.3.1 Modelo de poros (Izq.) y modelo de absorción-difusión (derecha)



La tendencia actual es utilizar el modelo de solubilidad-difusión incluso para describir las diversas variantes de la filtración. No obstante, hay que tener en cuenta que el modelo de poros siempre es aplicable en cuanto todos los cuerpos sólidos son en mayor o menor grado porosos.

En todas las situaciones prácticas el flujo de sustancias a través de poros puede considerarse de naturaleza laminar. Entonces el flujo másico total a través de los poros puede obtenerse fácilmente a partir de un balance de energía mecánica, que para fluidos incompresibles queda reducido a la ecuación (Ec.A.1.1.3.1):

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \sum F \quad (\text{Ec.A.1.1.3.1})$$

donde  $\Delta P$  es el gradiente de presión entre ambos lados de la membrana,  $\rho$  la densidad del fluido y  $\sum F$  las pérdidas de fricción por unidad de tiempo y masa en el poro, que se puede relacionar con diversos parámetros según la ecuación de Fanning (Ec.A.1.1.3.2):

$$F = 4 \cdot f \cdot \frac{L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot d} \quad (\text{Ec.A.1.1.3.2})$$

Donde  $4 \cdot f$  es el denominado factor de Fanning,  $L$  es la longitud equivalente del poro,  $d$  el diámetro hidráulico del poro y  $v$  la velocidad de circulación. Si el régimen es laminar, puede demostrarse a partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille que el factor  $4 \cdot f$  está relacionado con el número de Reynolds por la ecuación (Ec.A.1.1.3.3):

$$4 \cdot f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{Ec.A.1.1.3.3})$$

de donde resulta que la densidad de flujo másico ( $N_{\text{poros}}$ ) en una membrana viene dada por la ecuación (Ec.A.1.1.3.4), donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\eta$  la viscosidad y  $\text{Re}$  el número de poros por unidad de superficie;

$$N_{\text{poros}} = \frac{\rho \cdot d^2 \cdot \Delta P}{32 \cdot \eta \cdot L} \cdot n_{ps} \quad (\text{Ec.A.1.1.3.4})$$

En el desarrollo descrito se considera la hipótesis de que los poros son cilíndricos y que tienen un diámetro igual. De hecho las membranas reales no presentan estas características: los poros son "tortuosos" y hay poros con diferentes tamaños. Existen ecuaciones que son capaces de contemplar estos efectos, o bien se experimenta para determinar el valor de  $k$ , sabiendo que la densidad de flujo y el gradiente de presiones aplicado están en relación directa.



Para el caso de las membranas que internamente presentan una disposición más similar a un empaquetado de partículas que a una estructura de canales porosos. Por otra parte, en un gran número de operaciones de separación de membranas se produce un proceso de ensuciamiento en la superficie. El flujo de sustancias a través de esta capa de suciedad puede describirse mediante las ecuaciones que describen el flujo a través de lechos porosos. La ecuación descriptiva más utilizada en este problema es la de Kozeny-Carman (Ec.A.1.1.3.5), que tiene la forma siguiente:

$$N_{lecho} = \frac{\xi^3 \cdot d_p^2 \cdot \Delta P}{150 \cdot (1 - \xi)^2 \cdot \eta \cdot \rho \cdot L} \quad (\text{Ec.A.1.1.3.5})$$

donde  $N_{lecho}$  es la densidad de flujo másico,  $\xi$  es la porosidad (volumen vacío/volumen total),  $d_p$  el diámetro de las partículas que forman el lecho,  $\rho$  la densidad del fluido filtrado y  $L$  el espesor del lecho.

#### A.1.1.4. Naturaleza y tipos de membranas

Atendiendo a su naturaleza, las membranas se dividen dos grandes grupos: *orgánicas* e *inorgánicas*. En general las orgánicas son más fáciles de procesar y por lo tanto más baratas, mientras que las inorgánicas suelen ser más caras pero presentan ventajas tales como la resistencia a agentes químicos agresivos. Dentro del campo de las membranas orgánicas, las más utilizadas son las llamadas membranas cerámicas.

##### Membranas orgánicas

Las membranas orgánicas se obtienen a partir de diferentes polímeros homogéneos, como el polietileno, el polipropileno, el acetato de celulosa o las poliamidas. Son membranas económicamente asequibles pero presentan graves deficiencias en lo que se refiere a resistencias mecánica, térmica y química. La técnica más común de preparación de membranas orgánicas es mediante el método de inversión de fases. Este método básicamente consiste en precipitar de forma controlada un polímero disuelto añadiendo un "no-disolvente" a la disolución, de modo que el disolvente migra en el "no disolvente" y el polímero se va concentrando progresivamente

Las membranas asimétricas formadas por inversión de fase presentan una distribución de agregados variable según la profundidad considerada: a más profundidad mayor tamaño de agregados. La parte superior (con tamaño de poros más finos) es la que se pone en contacto con el rechazado. Si se pretende operar con tamaños de poro más finos (a efectos de modelización, prácticamente una capa densa), se lleva a cabo un tratamiento posterior sobre las membranas asimétricas. Este tratamiento consiste en sumergirlas en un baño que contenga monómeros. Los monómeros se depositan y polimerizan sobre la membrana. El



sustrato actuará básicamente como soporte para la capa así formada. A estas membranas se las denomina "membranas de composite". En una membrana composite la resistencia al flujo de sustancia permeable es debida casi exclusivamente a la piel de la membrana. Debido a su extremada delgadez el flujo de permeado puede ser muy grande aunque el coeficiente de difusión sea muy pequeño, pues tanto en los modelos de poros como en los de difusión, el flujo es inversamente proporcional al espesor del medio.

### Membranas Inorgánicas

- Membranas de Vidrios porosos: Para su fabricación se emplea un vidrio que contenga un determinado porcentaje de sólidos ácidos (sílica) y básicos. El vidrio se lleva a una temperatura lo suficientemente alta como para que funda pero sin que cambie su forma. En estas condiciones se separan dos fases una ácida y otra básica. Esta separación sucede a escala microscópica de modo que se forma un retículo de fase ácida en un "mar" básico. Si se añade un ácido capaz de disolver los álcalis de la fase básica queda al final el retículo de vidrio ácido (básicamente sílice). El tamaño de los poros puede ser fijado controlando el tiempo en que se permite la separación de fases.
- Membranas metálicas: Se obtienen a partir de pequeñas partículas metálicas que son sinterizadas, es decir unidas entre sí por efecto de la presión o la temperatura.
- Membranas cerámicas: Son las más importantes de este grupo. Pueden obtenerse mediante el procedimiento sol-gel, consistente en polimerizar compuestos organometálicos en condiciones muy controladas. Las membranas cerámicas se fabrican a partir de materiales como el óxido de zirconio, óxido de titanio, mezclas de ambos o alúmina. Son membranas mucho más caras que las orgánicas, pero poseen unas mayores resistencias, tanto química, mecánica y térmica. Además su mayor robustez permiten trabajar a elevadas velocidades de flujo. En la Fig. A.1.1.4.1 se puede realizar la comparación gráfica de la imagen SEM de la micromorfología superficial de ambos tipos de membrana. Se puede observar que la membrana cerámica tiene una superficie más lisa que la orgánica, cosa que explica que las membranas cerámicas tengan una menor tendencia a ensuciarse. Las numerosas ventajas de las membranas cerámicas hacen que éstas sean muy superiores a las orgánicas, pero su elevado precio limita notablemente su uso.



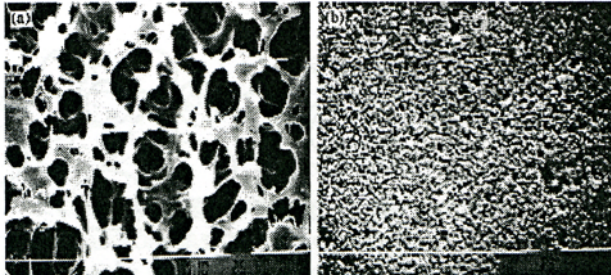


Fig.A.1.1.4.1 Imagen SEM membrana cerámica y orgánica

### A.1.1.5. Ensuciamiento de las membranas

El ensuciamiento o fouling es el principal inconveniente de los procesos de membrana. Consiste en la deposición sobre o dentro de la membrana de diferentes elementos presentes en el agua. Pese a que el mecanismo de este proceso todavía no está del todo claro se apunta a que es consecuencia de la interacción fisicoquímica de estos elementos con la membrana. En el caso de la depuración biológica, los elementos que suelen producir el fouling son proteínas, materias coloidales o las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que son metabolitos excretados por la biomasa depuradora. Existen dos tipos diferenciados de fouling:

- Fouling externo o reversible. Las sustancias se depositan sobre la membrana.
- Fouling interno o irreversible. Las sustancias taponan los poros del interior de la membrana.

El fouling interno es sin duda un mayor problema que el externo ya que su eliminación es mucho más complicada y a menudo se ha de sustituir la membrana o realizar agresivos lavados químicos. Las consecuencias del fouling son realmente graves. La consecuencia más fácilmente observable es una reducción en el caudal de permeado debido a la obstrucción de los poros, ya sea en el exterior como en su interior. El gráfico de la Fig. A.1.1.5.1 muestra la evolución del flujo de permeado a lo largo del tiempo [2], Como consecuencia de este hecho, se incrementa el gasto de energía. Si se quiere mantener un caudal de permeado constante, se ha de aplicar una mayor fuerza de succión lo que conlleva mayor gasto energético.

Además, el ensuciamiento de las membranas también es responsable de incrementar la frecuencia de las limpiezas y sustituciones de la membrana con las repercusiones económicas y de tiempo que esto implica.



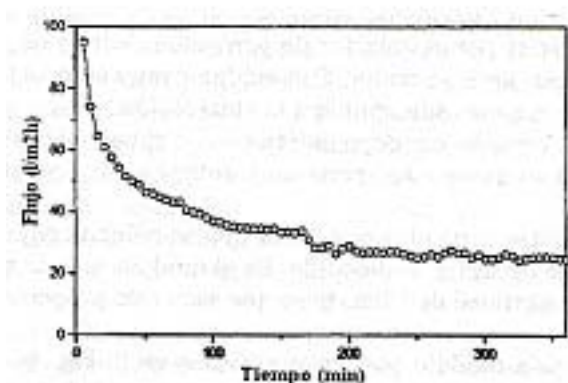


Fig.A.1.1.5.1 Reducción del flujo a causa del fouling

En la actualidad existen diversos tratamientos para minimizar o eliminar el ensuciamiento de la membrana. En general se pueden dividir en métodos físicos y químicos. Los métodos físicos más empleados son el **backflushing** y la creación de la turbulencia. Como método químico se suele utilizar un lavado químico.

El backflushing consiste en una inversión del flujo de permeado para eliminar las sustancias depositadas sobre la membrana. Dependiendo de la frecuencia y la intensidad de esta inversión se pueden encontrar tres tipos de backflushing. El **backwash**, en el que se invierte el flujo de paso por la membrana durante un o dos segundos cada pocos minutos; el **backpulse**, que se realiza con una frecuencia e intensidad mayor que el backwash y el backshock que es la técnica más agresiva ya que se invierte el flujo cada pocos segundos durante menos de un segundo. La creación de la turbulencia colabora a reducir el fouling ya que dificulta la deposición de los sólidos sobre la membrana.

Tanto el backflushing como la creación de turbulencia son únicamente útiles en el caso del fouling externo. Para el fouling interno el único método realmente eficaz es el **método químico**. El lavado químico consiste en lavar la membrana con diferentes productos químicos como detergentes, ácidos o bases. Con este método se restituye casi completamente la membrana, pero un uso demasiado frecuente puede perjudicar a la membrana reduciendo su vida útil además de poder contaminar el agua. Conviene, pues, evitar el abuso de este método y emplearlo únicamente cuando sea estrictamente necesario [2].



### **A.1.1.6. Aplicaciones industriales de las membranas**

#### **A.1.1.6.1. Módulos de membrana en las instalaciones**

Un módulo de membrana es la unidad de operación en la que se disponen las membranas. Los factores más a tener en cuenta a la hora de escoger un módulo son la facilidad de montaje y ensamblaje, elevada compactidad - es decir tratar el máximo de permeado posible con la mínima superficie - y permitir la modulación. En el mercado existen cuatro tipos principales:

- a) de placa y bastidor. Se basan en un seguido de membranas situadas sobre unas placas de soporte dispuestas una al lado de otra en unidades individuales. Son fácilmente desmontables, pero disponen de una baja densidad de compactado (100 - 400 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>).
- b) de enrollamiento en espiral. Se basan en un envoltorio de dos membranas enrolladas en cilindros separados entre sí por el colector de permeado. Varios de estos cilindros se disponen de esta manera separados por un espaciador. Son módulos muy compactos ( 700 - 1000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), pero el espaciador provoca que sea más susceptible a la obstrucción.
- c) tubulares. Son cilindros en cuyo interior se disponen las membranas también en forma cilíndrica. Son muy poco compactos pero muy robustos, y pueden procesar corrientes de gran velocidad.
- d) de fibra hueca. Están formados por fibras que se reúnen conjuntos de miles y hasta millones dentro de unos cilindros de resina endurecida. Es el módulo más compacto ( 1000 - 10000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), pero la presencia de tal cantidad de fibras hace que sean más propensas al ensuciamiento.

#### **A.1.1.6.2. Aplicaciones técnicas específicas**

Tanto las membranas orgánicas como las membranas cerámicas tienen importantes aplicaciones actuando sobretodo en procesos de ultrafiltración y osmosis inversa. La aplicación que viene siendo la más difundida en los últimos 20 años es la purificación de agua por osmosis inversa, para producir agua ultrapura para calderas de alta presión, pintura, productos farmacéuticos, cosméticos, bebidas y, con importancia creciente, producción de agua potable para consumo humano, desde 4 L/día hasta 300.000 L/día. No sólo es posible potabilizar agua de mar o salobre, sino que separa el arsénico, flúor, plaguicidas, fertilizantes y otros compuestos que hacen el agua peligrosa para la salud humana. Con las membranas de osmosis inversa se reducen hoy día la concentración de sales del agua del mar en unas 100 veces, es decir, se pasan de 35.000 mg/L a unos 350 mg/L.



Para la aplicación en la desalación, de aguas, la capacidad de rechazo de sales es uno de los parámetros más importantes de una membrana. También es importante definir la calidad y parámetros del agua a tratar. Las membranas de acetato de celulosa tienen la resistencia más alta al cloro residual de las membranas disponibles en el mercado, y han demostrado alta resistencia a niveles de cloro residual de más de 0,5 ppm y de hasta 2 ppm. Por lo tanto, para aguas con materia en suspensión susceptible de generar colonias bacterianas que han sido cloradas, la membrana de acetato de celulosa puede ser la mejor elección, ya que además estas membranas tienen muy baja tendencia a ensuciarse y cuando se efectúa una limpieza, se recuperan fácilmente. Mientras que si el agua es nítida y cristalina y puede contener cloraminas, esta puede ser la aplicación correcta para membranas de poliamida aromática, que toleran algo de cloro residual y algo más de oxidantes secundarios. Las membranas de poliamida son las más rudas y resistentes al ensuciamiento con hierro y con coloides. Estas membranas se recomiendan cuando se requiere, rechazo de sales más alto de lo que se puede obtener a baja presión.

Las membranas cerámicas, por su parte, aportan ventajas en cuanto a resistencia química y operatividad (ausencia de hidrofobia o problemas de polarización) que las hacen adecuadas para el trabajo con aguas residuales industriales, ya que en este campo las aguas pueden tener materia orgánica, iones, reactivos, etc., con una gran diversidad de calidades. Entonces la instalación debe ser resistente a los valores extremos de pH, resistente a temperaturas elevadas y evitar el ensuciamiento, cualidades que cumplen estas membranas. Además, en ocasiones el ensuciamiento solamente se puede resolver con agresivos lavados químicos que permiten la continuidad del proceso en el tiempo. Por lo tanto es fundamental que los materiales de construcción de la membrana y de la planta resistan las condiciones a las que se le somete, aunque sea temporalmente.

Una aplicación innovadora es el **biorreactor de membrana (MBR)**. Este tratamiento combina un proceso de depuración biológica con una filtración por membrana. La membrana retiene prácticamente la totalidad de los sólidos en suspensión y la biomasa, logrando de esta manera un efluente de gran calidad. Además se trata de un sistema muy compacto que permite un notable ahorro de espacio respecto a las plantas de fangos activado convencionales. El sistema MBR es un tratamiento relativamente reciente. Pese a que ya en la década de los 70 se hablaba de la utilización de un sistema de membrana para la retención de la biomasa, no fue hasta la década de 1980 que esta tecnología se hiciera un hueco en Estados Unidos y, sobretodo, Japón. Europa no se unió a este grupo hasta bien entrados los 90.

Por último, cabe destacar la aplicación de las membranas cerámicas en el campo de reactores de membrana, desarrollado rápidamente en las dos últimas décadas, y que entre las más recientes está el uso de reactores de membrana cerámica en procesos de reducción de contaminación ambiental, como la filtración de gases con eliminación simultánea de



óxidos de nitrógeno o COVs. En estudios de laboratorio se han desarrollado convertidores catalíticos basados en el uso de membranas cerámicas catalíticas, como las de platino y alúmina.

## A.1.2. Membrane Bioreactor (MBR) System

El proceso es una tecnología que consiste en un reactor biológico integrado de crecimiento suspendido con un sistema de membrana de ultrafiltración, usando la membrana de fibra hueca, tal y como muestra la figura A.1.2.1. Esencialmente, el sistema de ultrafiltración sustituye la función de separación de sólidos de los decantadores secundarios y los filtros de arena de un sistema convencional de lodos activados.

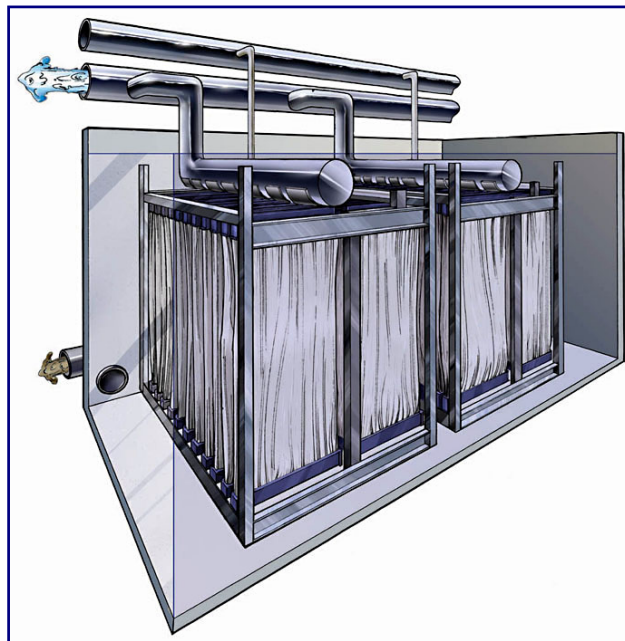


Fig.A.1.2.1 Ejemplo instalación membrana hueca

Las membranas de ultrafiltración están sumergidas en un tanque de aireación, en contacto directo con el licor de mezcla. Por el empleo de una bomba de permeato, el vacío es aplicado al cabezal conectado a las membranas. El vacío aspira el agua tratada a través de las membranas de ultrafiltración de fibra hueca. El permeato entonces es dirigido a las instalaciones de descarga o de desinfección. La corriente de aire intermitente es introducida en el fondo del módulo de la membrana, produciendo una turbulencia que friega la superficie



externa de las fibras huecas. Esta acción de fregamiento transfiere alimentos sólidos rechazados lejos de la superficie de la membrana.

La tecnología MBR vence con eficacia los problemas asociados con la pobre sedimentación de lodo en procesos convencionales de lodos activados. La tecnología MBR permite el funcionamiento del bioreactor con concentraciones bastante más elevadas de sólidos en el licor de mezcla que los sistemas convencionales de lodos activados que están limitados por la decantación del lodo. El proceso MBR es manejado típicamente a una concentración de sólidos en suspensión en el licor de mezcla (MLSS) entre 8.000 y 10.000 mg/L. Concentraciones de biomasa elevadas permiten una eliminación altamente eficaz del material biodegradable en partículas y del material soluble en la corriente residual. El proceso MBR combina las operaciones de unidad de aireación, la clarificación secundaria y la filtración en un solo proces, produciendo un efluente de alta calidad, simplificando la operación y reduciendo enormemente exigencias espaciales.



Fig.A.1.2.2 Muestras de agua entrada y salida

### A.1.3. Características y ventajas del MBR

#### A.1.3.1. Experiencia

Diversas marcas tienen más de 20 años de experiencia en MBR y ha instalado sistemas MBR que operan desde 1993 desde el tamaño de unos pocos miles de galones por día



hasta más de 10 MGD de caudal promedio al día. La tecnología de las membranas sumergidas, al principio fue desarrollada para bioreactores de aguas residuales e inmejorablemente encaja en aplicaciones con tales altos contenidos en sólidos. Con más de 500 instalaciones de aguas residuales a escala mundial, incluyendo numerosas instalaciones de escala grande y la experiencia de operaciones del MBR'S sumergido, diversas marcas proporcionan la seguridad y el aseguramiento de las instalaciones de un sistema de membranas probado y fiable.

### A.1.3.2. Calidad del efluente y potencial de reutilización

Según el uso específico y exigencias de diseño, una planta MBR puede alcanzar tanto efluentes nitrificados de alta calidad como, con la adición de una zona anóxica, efluentes denitrificados de la alta calidad. La eliminación de fósforo se consigue fácilmente por medios biológicos y/o la adición de sales metálicas a las aguas negras de entrada o al licor de mezcla. El efluente de alta calidad del sistema MBR, como indica la tabla A.1.3.2.1 cumple leyes de vertido nacionales y europeas y exigencias similares reguladoras y satisface inmejorablemente usos de reutilización como la cancha de golf y la irrigación de tierra de parque, recarga de la capa acuífera y la reutilización urbana. Los sistemas MBR son capaces de alcanzar las calidades de efluente siguientes.

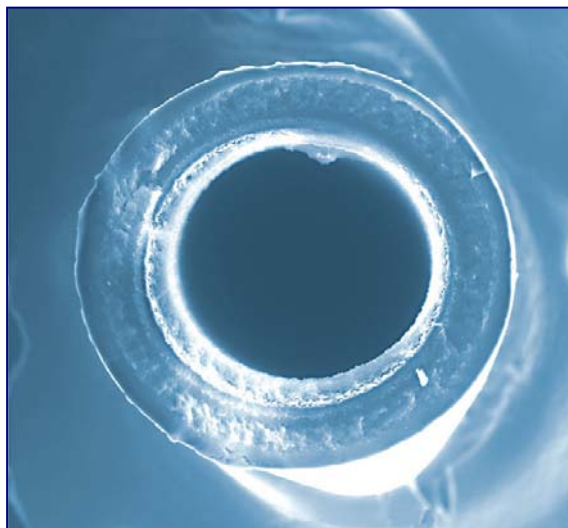


Fig.A.1.3.2.1 Ampliación sección membrana hueca

BOD	< 5 mg/L
TSS	< 5 mg/L
TN	< 3 mg/L <i>Warm Climates</i>



	< 10 mg/L <i>Cool Climates</i>
TP	< 0.1 mg/L
Turbidity	< 1 NTU

Tabla.A.1.3.2.1 Parámetros de salida garantizados con membrana hueca

La información proporcionada en esta sección es general y tiene la intención sólo de indicar lo que la Tecnología de membranas MBR de tratamiento de aguas residuales es capaz de alcanzar. Para el diseño específico basado en la consideración de características de aguas residuales brutas específicas y los criterios de descarga requeridos para el efluente tratado.

### A.1.3.3. Plantas compactas

El proceso MBR típicamente maneja concentraciones de sólidos suspendidos en el licor de mezcla (MLSS) en la gama de 8,000 a 10,000 mg/L, que son considerablemente mayores que procesos de lodos activados convencionales.

La elevada concentración de MLSS permite que valores convencionales de carga orgánica pueden ser alcanzados con tiempos de residencia hidráulica muy inferiores.

La compresión del proceso de tratamiento de aguas negras en un proceso de una sola etapa da lugar a una planta considerablemente más pequeño que las plantas de tratamiento terciario de aguas residuales convencionales.

Además, la huella compacta permite la expansión de la capacidad de la planta dentro de las balsas existentes de una planta convencional en muchos casos.

En la figura A.1.3.3.1 se muestra una instalación típica de planta compacta perfilada para la reducción de espacios y maniobrabilidad adecuada.



---

Fig.A.1.3.3.1 Planta compacta

#### A.1.3.4. Expansibilidad

El equipo MBR es de naturaleza modular y por lo tanto permite la construcción o la extensión de planta que puede ser completada en fases durante la vida del equipo tal y como muestra la figura A.1.3.4.1. Los trabajos civiles pueden ser diseñados para el último flujo mientras las membranas son añadidas en fases según los dictados de la capacidad de operación de la planta.



---

Fig.A.1.3.4.1 Capacidad de expansibilidad

#### simple

#### A.1.3.5. Operación

El proceso MBR usa membranas para realizar la separación sólida/líquida, y por lo tanto no hay ninguna exigencia para el lodo para sedimentar. Así no hay ninguna necesidad de



decantador secundario o filtros que pulen. El lodo es gastado directamente del tanque de aireación con una concentración de sólidos en la gama de 0.8 – 1.0 por ciento de sólidos. El resultado es un solo sistema, que es simple de manejar.

#### **A.1.3.6. Fiabilidad del proceso**

Ya que este tipo de plantas MBR típicamente es manejada en valores de bajas cargas orgánicas, y la membrana proporciona una barrera a la descarga de partículas, la calidad del efluente de una membrana MBR no es susceptible a los picos hidráulicos u orgánicos que pueden afectar negativamente la calidad de efluente en el lodo convencional activado y plantas de película fija. En los períodos de bajo caudal (y carga orgánica), el lodo dentro del tanque del reactor simplemente se digiere el mismo sin afectar la calidad de efluente.

#### **A.1.3.7. Resistencia al ensuciamiento**

Esta clase de membranas es de tipo " Outside - In " donde el flujo del agua va desde el exterior de la membrana al interior de la fibra hueca, significando que el interior sólo ve el agua limpia, filtrada por la membrana. Como muestra la figura A.1.3.7.1 las bacterias y los sólidos inertes eliminados de las aguas negras permanecen fuera de la membrana y nunca entran en la membrana para causar el ensuciamiento.

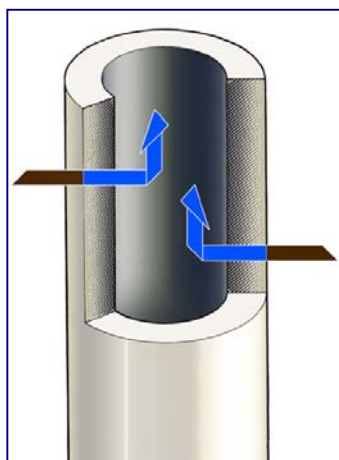


Fig.A.1.3.7.1 Flujo del agua a través de la membrana

#### **A.1.3.8. Durabilidad excepcional de la membrana**

La membrana ha sido diseñada para una durabilidad excepcional y resistencia a la fractura. Para alcanzar este nivel alto de durabilidad de la membrana se utiliza un soporte interno al



cual la membrana es vinculada. Este soporte refuerza la membrana y lo protege contra la rasgadura y la fractura sin reducir su capacidad de flujo.

#### **A.1.4. parámetros de diseño del sistema propuesto.**

La siguiente información proporciona un resumen de los criterios de diseño, información del diseño del proceso y el comportamiento previsto de los sistemas MBR propuestos.

##### **A.1.4.1. Caudal de diseño**

Caudal de diseño	Agua bruta
Caudal medio diario	5,700 m <sup>3</sup> /día
Caudal mensual máximo	7,125 m <sup>3</sup> /día
Caudal diario máximo	8,550 m <sup>3</sup> /día
Caudal punta horario	8,550 m <sup>3</sup> /día

Tabla.A.1.4.1.1 Parámetros de diseño

El diseño se basa en laminar el caudal punta de 13,680 m<sup>3</sup>/d en el homogenizador y tratar el caudal máximo de 8,550 m<sup>3</sup>/d. El caudal será bombeado desde el homogeneizador al bioreactor y de éste mediante bombas enviar el caudal necesario hasta los tanques de membranas para el tratamiento de filtrado y el caudal necesario para mantener la concentración de sólidos óptima dentro de los tanques y recircular el fango activo hasta el recinto biológico previo al sistema de membranas de ultrafiltración.

Una vez alcanzado el máximo nivel de concentración de sólidos en el reactor será necesaria la purga de fangos hasta el espesador de fangos, dispuesto en planta depuradora.

##### **A.1.4.2. Parámetros físicos**



Parámetro	Agua bruta	Agua tratada
Temperatura mínima del agua residual.	20 °C	
DBO	300 mg/L	≤ 5 mg/L
TSS	400 mg/L	≤ 5 mg/L
NTK	60 mg/L	n/a
NH <sub>3</sub> -N	45 mg/L	n/a mg/L
NT	N/A	≤ 15 mg/L
PT	9 mg/L	< 1 mg/L
Turbidez	n/a NTU	1.0 NTU
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	270*	n/a

Tabla.A.1.4.2.1 Parámetros físicos

### A.1.4.3. Diseño preliminar del proceso

Parametro	Cantidad	Unidades
Volumen de trabajo total del tanque anóxico	739	m <sup>3</sup>
Volumen de trabajo aerobio (excluyendo las membranas)	1,850	m <sup>3</sup>
Número de trenes de membranas	4	
Dimensiones del tanque de membranas	7.16 x 3.05 x 3.5 *	m L x W x H



Volumen total del tanque de membranas	235	m <sup>3</sup>
Diseño HRT	9.5	horas
Diseño SRT	12	días
Diseño SSLM	8,000 to 10,000	mg/L

Tabla.A.1.4.3.1 Diseño preliminar. Valores

El diseño se basa en la utilización del bioreactor existente, después de modificar la infraestructura , para las zonas aerobias y las anóxicas. Construyendo nuevos tanques de acero prefabricado alineados para membranas en el espacio entre el bioreactor y el decantador secundario.

#### A.1.4.4. Carretes de membranas de ultrafiltración

Parámetro	Cantidad
Flujo de diseño de la membrana	19.5 l/mh at ADF 29.4 l/mh at MDF 29.4 l/mh at PHF 26.0 l/mh at ADF @ N-1
Número de trenes de membrana	4
*ADF Capacidad con un tren off-line	5,700 m <sup>3</sup> /día
Numero de carretes por tren	2
Numero de espacios de carrete por tren	3



Numero de módulos por carrete	48 en un carrete de 48
Total de carretes de membrana instalados	8
Total de espacio sobrante	30 %

Tabla.A.1.4.4.1 Características carretes de membranas

\*El diseño se basa en poner un tren fuera de servicio para la limpieza u otros servicios de mantenimiento durante el caudal medio diario, durante el caudal máximo diario un tren puede ser puesto fuera de servicio durante un período de tiempo < 24 horas al día.

#### A.1.4.5. Descripción del funcionamiento

Cuando un sistema de aguas residuales experimenta cambios o caudales de lluvia, las membranas han de ser capaces de responder. Limpiar es absolutamente crítico para asegurar un funcionamiento regular del MBR. Los módulos de membranas se basan a propósito en la geometría de las fibras huecas la cual es más versátil porque se puede limpiar automáticamente más a menudo, cuando es necesario, y así está a punto y mejor preparada para cambios.

Hay varias propiedades de una membrana que son necesarias para que pueda ser lavada frecuentemente, entre ellas:

- capacidad de pulsar a contracorriente un caudal que proporciona beneficio de limpieza con la correspondiente presión a la que la membrana pueda trabajar.
- capacidad de limpiar rápida y fácilmente; y
- capacidad de funcionar correctamente inmediatamente después de limpiar sin necesidad de “madurar” para formar una “capa” de “gel” filtrante.

Cada ciclo de filtración consta de un período de producción seguido por una relajación o un periodo de contrapulsación, que ayuda a mantener la membrana limpia.

Por dichas razones, en operaciones MBR a largo plazo, es esencial incorporar un método multietapa para mantener el funcionamiento de las membranas en cada sistema MBR. Existen varias estrategias de limpieza para las membranas que aseguran una producción



óptima de permeado con una mínima inversión de tiempo y de recursos para el mantenimiento.

**Los sistemas de limpieza incluidos para este MBR incorporan procesos completamente automáticos tales como relajación, pulsar a contracorriente, limpieza de mantenimiento y una limpieza de recuperación iniciada por operador.** La metodología de limpieza es muy flexible ya que el sistema se puede iniciar para que funcionen todos o solamente algunos de los procesos de limpieza para maximizar el funcionamiento del sistema de membranas, basado en las condiciones específicas del momento.

Durante la operación normal, los sistemas de filtración de membranas operan con un ciclo de filtración repetido, el cual consta de un período de producción (permeación) seguido de una relajación o período de retropulsación.

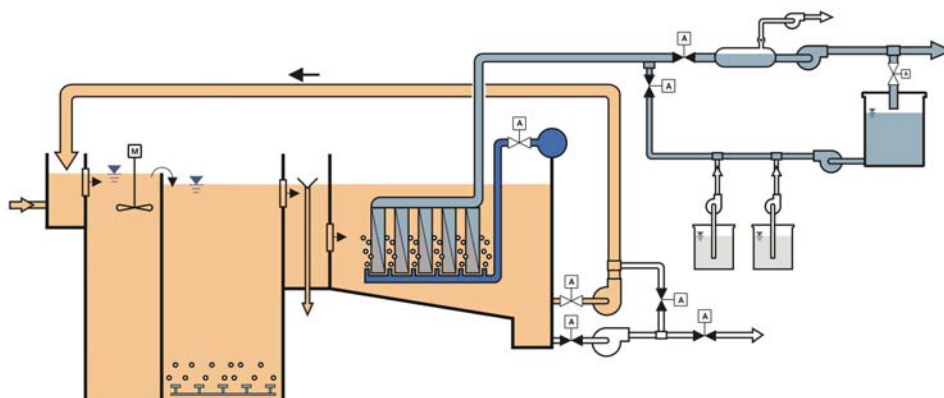
Los sistemas MBR tienen la capacidad única de operar tanto en modo relajación como en modo retropulsación. En condiciones normales los sistemas trabajan en modo relajación, mientras que *durante la puesta en marcha o en condiciones de pobre filtrabilidad del fango el sistema se hace trabajar en modo retropulsación.*

A continuación se proporcionan detalles del ciclo de filtración con relajación y retropulsación, indicándolo con esquemas para facilitar el entendimiento de las operaciones específicas de cada uno de los procesos.

#### A.1.4.5.1. Relajación

Mientras se opera en modo relax, la bomba de permeado para cada tren se para secuencialmente durante un corto período de tiempo cada 10-12 minutos para permitir la purga de aire de la membrana sin permeación. No se utilizan ni reactivos químicos ni permeado durante el modo de relajación.

Durante el modo de relajación, se para la permeación mientras la aireación continua para la purga de la membrana, lo cual ayuda en la eliminación de sólidos tal y como se detalla en la figura A.1.4.5.1.1



---

Fig.A.1.4.5.1.1 Esquema de flujo del proceso – Modo relajación

#### A.1.4.5.2. Retropulsación o Retrolavado

Bajo ciertas condiciones de destrucción y condiciones de pobreza de fangos, la capacidad para retropulsar es esencial para mantener una membrana limpia. Este hecho permite un funcionamiento del sistema fiable y flexible cuando hay influentes o escenarios de operación de proceso inesperados. La aplicación de la opción de limpieza a retropulsación es uno de los métodos más simples para asegurar que las membranas sumergidas retienen la permeabilidad óptima en todas las condiciones de operación.

La retropulsación comprende invertir el flujo a través de las membranas para expandir ligeramente los poros de la membrana y eliminar algunas partículas que se pueden haber adherido a la superficie de la fibra de la membrana. La mitad del tren de cassettes de membrana se retropulsa a la vez utilizando el permeado almacenado en el tanque de retropulsación.

Una planificación optimizada de la limpieza con retropulsación puede asegurar que el aparato se beneficie de:

- Una permeabilidad alta en la membrana;
- Eficacia en el funcionamiento de la planta con un mínimo tiempo de paro;
- Frecuencia reducida de recuperación y limpieza de mantenimiento;
- Bajo consumo de productos químicos de limpieza.

Tal y como indica la figura A.1.4.5.2.1 durante el modo de retropulsación, la permeación se para las bombas de permeado utilizadas dan marcha atrás al permeado a través de las membranas para limpiar los poros y eliminar las partículas de la superficie.



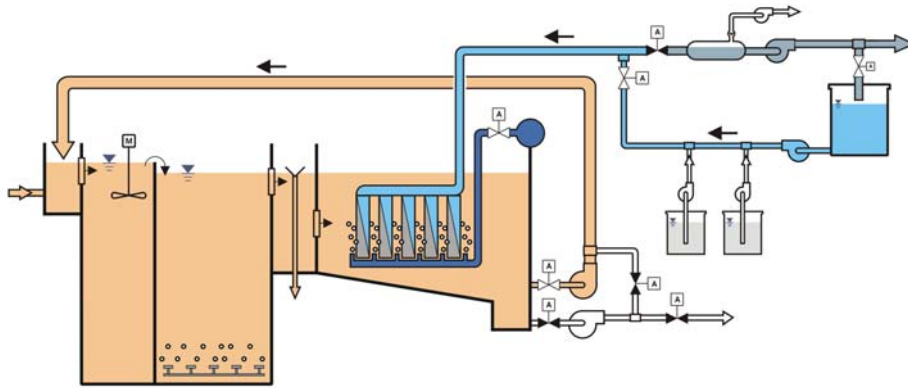


Fig.A.1.4.5.2.1 Esquema de flujo del proceso – Modo retroimpulsión

Junto con el ciclo de filtración normal, una limpieza química regular es esencial para mantener el funcionamiento de la membrana. Hay básicamente dos filosofías para la limpieza de la membrana. Una es permitir que la membrana trabaje durante largos períodos de tiempo, llegar a estar sucia y entonces llevar a cabo periódicas e intensivas limpiezas de recuperación. La otra filosofía es proporcionar alguna cantidad de limpieza regular y limpiezas de recuperación poco frecuentes. En este caso utilizo la última opción; mantiene siempre la membrana en un estado de buena disposición para manejar momentos de caudales punta cuando ocurren. Esto se consigue utilizando mantenimiento in situ automático y limpiezas de recuperación como se describen a continuación

#### A.1.4.5.3. Limpieza de mantenimiento

El procedimiento de la limpieza de mantenimiento es completamente automático y programado para que no ocurra durante las horas pico del día. El sistema de filtración de membranas para este MBR incluye la limpieza de mantenimiento utilizando hipoclorito sódico y ácido cítrico por si hay la posibilidad de un ensuciamiento inorgánico.

El procedimiento de la limpieza de mantenimiento del tanque vacío incorpora las siguientes características:

- completamente automático una vez la frecuencia es marcada por el operador;
- funcionamiento sin drenaje del tanque de membranas; y
- requiere una baja concentración química.



La secuencia de la limpieza de mantenimiento del tanque se muestra en la figura A.1.4.5.3.1 en el que el procedimiento de limpieza de mantenimiento está completamente automatizado y programado para no ocurrir durante las horas pico del día, de modo que la planta este preparada cuando se necesite sin atención del operador.

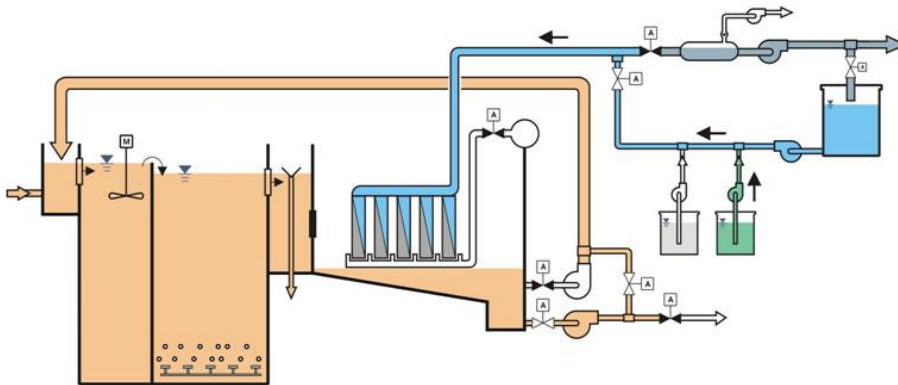


Fig.A.1.4.5.3.1 Esquema de flujo del proceso – Modo limpieza mantenimiento

#### A.1.4.5.4. Limpieza de recuperación

La limpieza de recuperación es necesaria para reestablecer la permeabilidad de la membrana una vez la membrana empieza a estar sucia. Una limpieza de recuperación debería iniciarse cuando la permeabilidad declina.

El proceso de limpieza de recuperación consiste secuencia de retropulsación química, similar al procedimiento de limpieza de mantenimiento, seguido por un período de remojo químico. Las concentraciones de limpieza química que se utilizan habitualmente para remojar las membranas son de 1.000 mg/L hipoclorito sódico ( $\text{NaOCl}$ ) para la eliminación de los contaminantes orgánicos y de 2,000 mg/L de ácido cítrico para la eliminación de los contaminantes inorgánicos.

Las características claves para el procedimiento de la limpieza de recuperación para el sistema de membranas de filtración son:

- Automatización completa una vez iniciado por el operador;
- Limpia todos los cassettes de membranas de un tren al mismo tiempo;
- Se recomienda realizarlo dos veces al año.
- Requiere concentración química moderada.



- Incluye la neutralización de los fangos

La secuencia de la limpieza de recuperación se muestra en la figura A.1.4.5.4.1. La limpieza de recuperación restaura la permeabilidad después que las membranas se han atascado. Un tren se elimina? durante 6-16 horas.

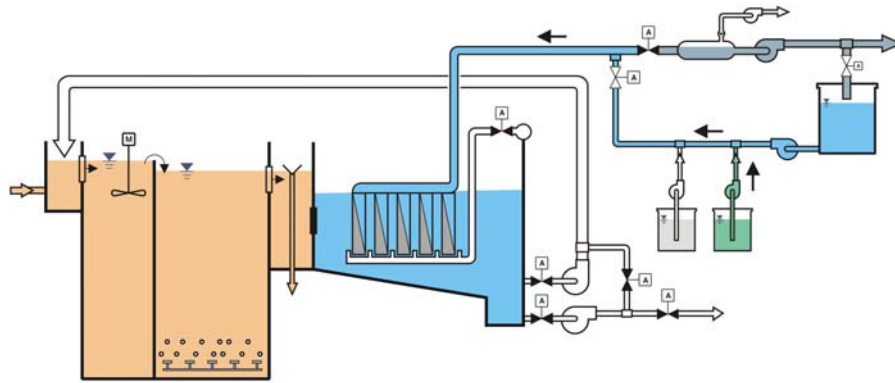


Fig.A.1.4.5.4.1 Esquema de flujo del proceso – Modo limpieza de recuperación

