

# PROCESOS DE MEMBRANA: GENERALIDADES Y APLICACIONES AL CICLO INTEGRAL DEL AGUA



**Silvia Álvarez Blanco y Jose Antonio Mendoza Roca**

Instituto Universitario de Investigación ISIRYM  
Departamento de Ingeniería Química y Nuclear  
Universidad Politécnica de Valencia

# GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANA

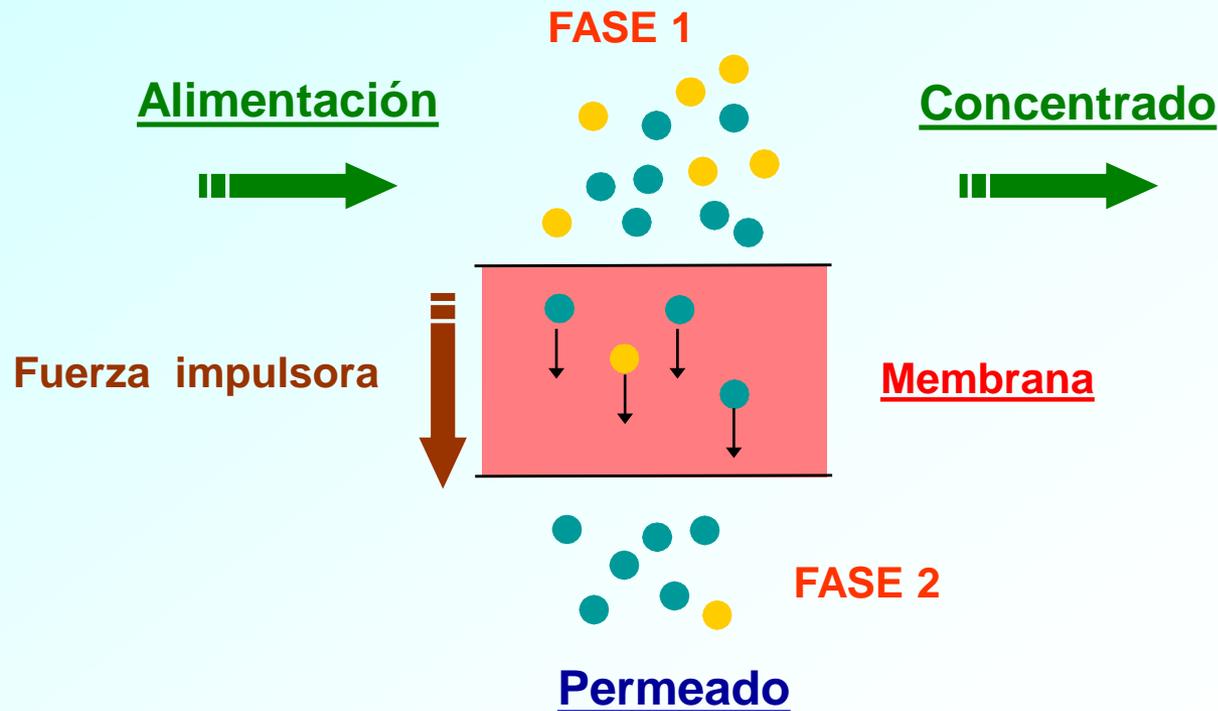
## ÍNDICE

- ⇒ **Introducción**
- ⇒ **Clasificación de los procesos de membrana**
- ⇒ **Principales procesos de membranas**
- ⇒ **Parámetros característicos**
- ⇒ **Membranas y módulos**
- ⇒ **Ensuciamiento y limpieza de las membranas**

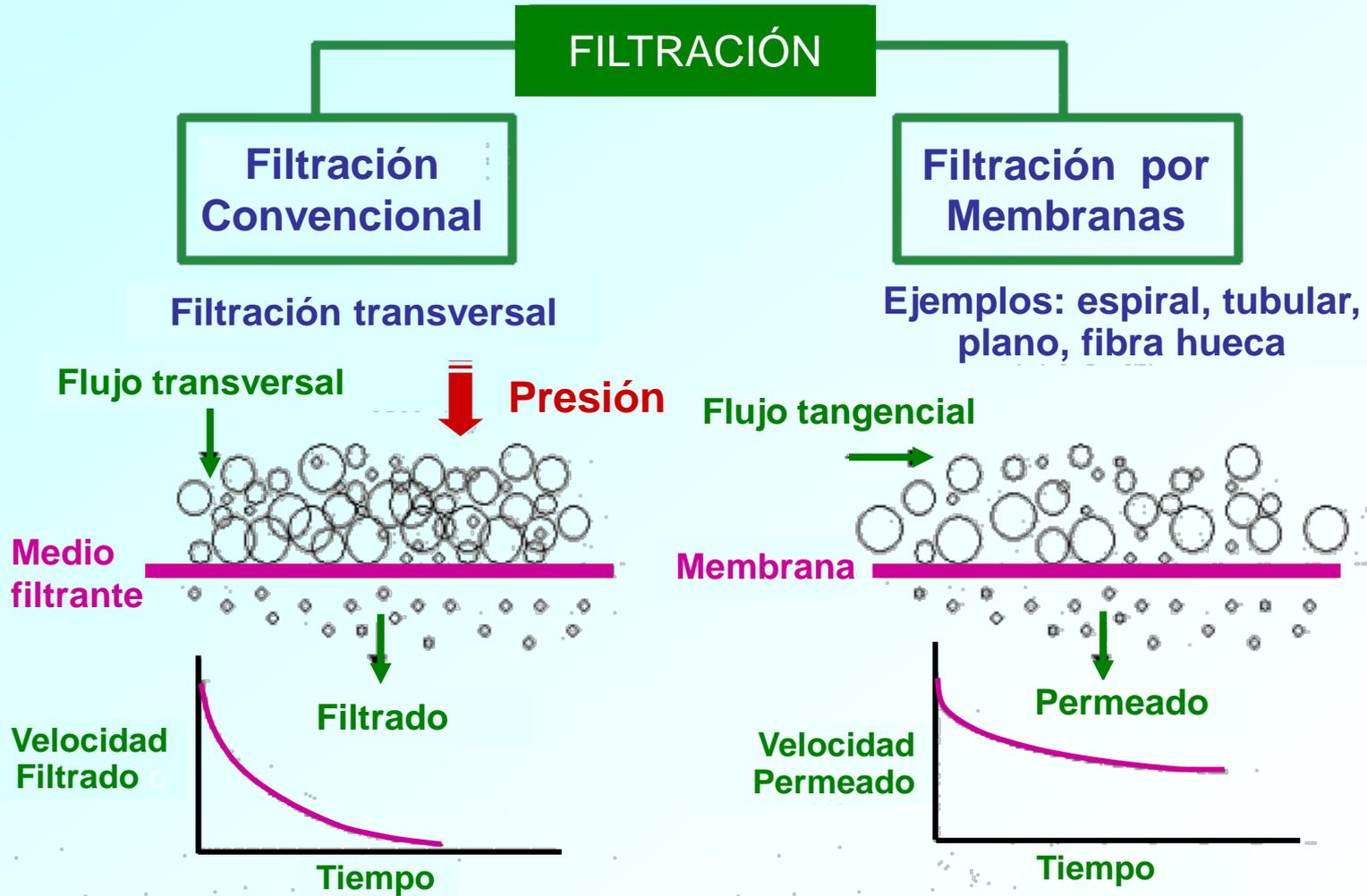
# Concepto de membrana semipermeable

Una "membrana semipermeable" es una barrera selectiva que permite el paso de ciertas sustancias a su través en mayor proporción, mientras que impide o restringe el paso de otras sustancias.

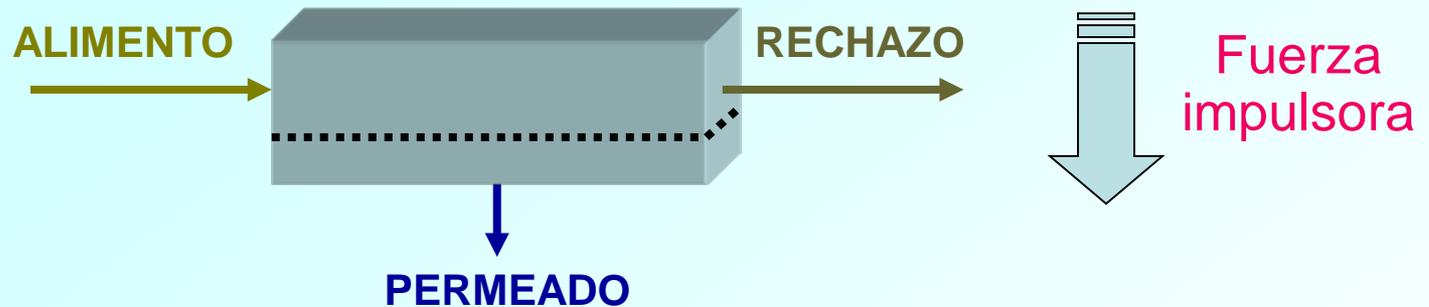
El "transporte selectivo" se debe a diferencias en la carga eléctrica o el tamaño molecular.



# Comparación con la filtración convencional



# Aplicaciones de la separación por membranas



**Purificación:** Las impurezas (componentes indeseables) se eliminan bien en la corriente de permeado o en el rechazo.

**Fraccionamiento:** Cuando una mezcla se separa en dos o más componentes deseados.

**Concentración:** Cuando el componente deseado se encuentra a baja concentración, y es el disolvente de la corriente que se elimina en el proceso (permeado).

# Características generales de las membranas

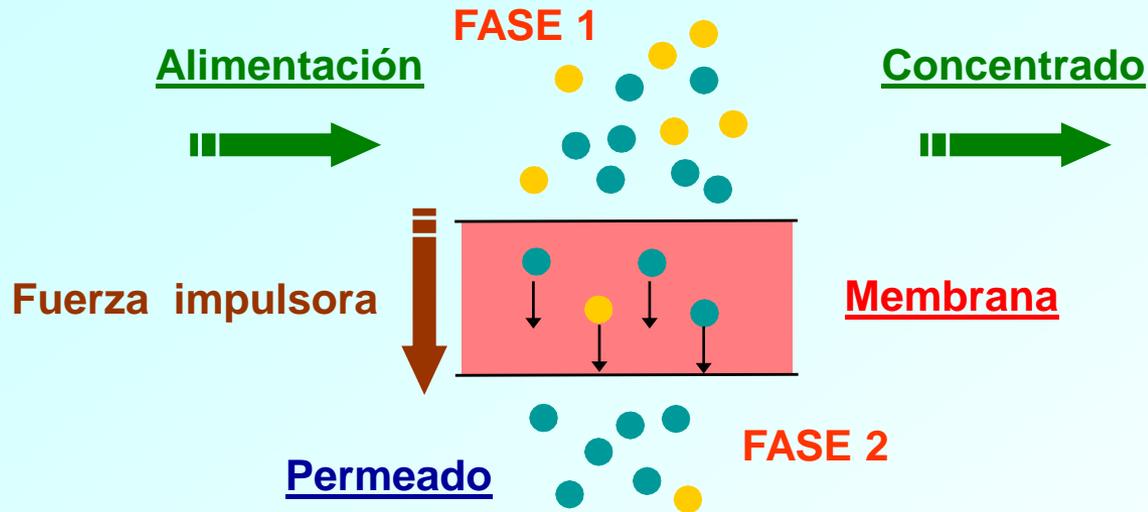
Las membranas deben reunir una serie de características como son:

BUENA SELETIVIDAD

ELEVADA PERMEABILIDAD

ESTABILIDAD

La **SELECTIVIDAD** es la característica más importante de las membranas y determina la capacidad de la misma para “rechazar” partículas, moléculas o iones (dependiendo del proceso).



La selectividad se determina por el coeficiente de retención o “rechazo”

Coeficiente de rechazo

$$R_i = 1 - \frac{C_{P,i}}{C_{A,i}}$$

Concentración del componente (i) en el permeado

Concentración del componente (i) en el alimento

# Características generales de las membranas

Las membranas deben reunir una serie de características como son:

BUENA SELETIVIDAD

ELEVADA PERMEABILIDAD

ESTABILIDAD

La **PERMEABILIDAD** evalúa la productividad y se caracteriza por medio de la densidad de flujo de permeado (J) y es proporcional a la magnitud de la fuerza impulsora. Depende de varios factores como son:

- **Espesor de la membrana** (la permeabilidad es inversamente proporcional al espesor)
- **Magnitud de la fuerza impulsora**
- **Dimensión de los poros** (y su distribución en la superficie de la membrana)
- **Condiciones hidrodinámicas** (velocidad de flujo de la alimentación)
- **Características de la alimentación** (temperatura, concentración, viscosidad, etc. afecta a fenómenos como al ensuciamiento de la membrana o a la concentración por polarización)

$$J = \frac{Q_P}{\text{Área}} = -A \cdot \frac{dX}{dx}$$

Diagram illustrating the permeability equation with annotations:

- Fuerza impulsora** (Driving force) points to  $dX$ .
- Espeor de la membrana** (Membrane thickness) points to  $dx$ .
- Coficiente fenomenológico** (Phenomenological coefficient) points to  $A$ .

# Características generales de las membranas

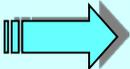
Las membranas deben reunir una serie de características como son:

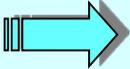
BUENA SELETIVIDAD

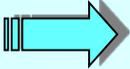
ELEVADA PERMEABILIDAD

ESTABILIDAD

En cuanto a la ESTABILIDAD, una membrana debe tener:

 Estabilidad química → frente al pH y los agentes químicos

 Estabilidad térmica → frente a la temperatura

 Estabilidad mecánica → frente a las presiones de operación

# Ventajas de los procesos con membranas

- **Bajo coste energético**, pues no hay cambio de fase.
- **Operación bajo condiciones suaves (temperatura)**. Se pueden separar compuestos sensibles a la temperatura.
- Posibilidad de llevar a cabo el **proceso de separación en continuo**.
- Fácilmente **automatizables**.
- **Adaptabilidad a distintos tipos de aplicaciones**, gracias a que podemos encontrar membranas con propiedades muy diferentes.
- **No se necesita incorporar ningún producto químico externo a la disolución a tratar. Son tecnologías respetuosas con el medio ambiente.**
- **Instalaciones compactas**, pues los equipos suelen ser relativamente pequeños.
- **Fácil cambio de escala**, pues los equipos son modulares.
- **Facilidad de montaje, desmontaje y operación**.
- Posibilidad de ser combinados con otros procesos de tratamiento: **Procesos híbridos**.

# Desventajas de los procesos con membranas

- **Ensuciamiento de las membranas**, que reduce la permeabilidad e incluso puede reducir la vida útil.
- **Elevado coste** de las membranas.
- **Falta de selectividad** para algunas aplicaciones.
- Algunos materiales son **sensibles al ataque químico** causado por ácidos, bases, oxidantes y disolventes orgánicos.
- Algunos materiales **no tienen buena resistencia mecánica** a las abrasiones, vibraciones, altas temperaturas o presiones.

# GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANA

## ÍNDICE

- ⇒ **Introducción**
- ⇒ **Clasificación de los procesos de membrana**
- ⇒ **Principales procesos de membranas**
- ⇒ **Parámetros característicos**
- ⇒ **Membranas y módulos**
- ⇒ **Ensuciamiento y limpieza de las membranas**

# Clasificación según la fuerza impulsora

El transporte a través de una membrana se debe a la acción de una **fuerza impulsora** que actúa sobre el lado del alimento (Fase 1), y cuya magnitud de forma general es proporcional a la velocidad de permeación.

La relación de proporcionalidad entre la densidad de flujo de permeado (J) y dicha fuerza impulsora viene dada por:

$$J = -A \cdot \frac{dX}{dx}$$

Diagram illustrating the relationship between the permeation flux density (J) and the driving force. The equation is  $J = -A \cdot \frac{dX}{dx}$ . The coefficient  $A$  is labeled as "Coeficiente fenomenológico" (phenomenological coefficient). The term  $\frac{dX}{dx}$  is labeled as "Fuerza impulsora" (driving force).

# Clasificación según la fuerza impulsora

La “membrana” actúa como una interfase en la cual una partícula o molécula permea experimentando una resistencia al transporte.

PROCESO	FASE 1	FASE 2	FUERZA IMPULSORA
Microfiltración	L	L	$\Delta P/\Delta x$
Ultrafiltración	L	L	$\Delta P/\Delta x$
Nanofiltración	L	L	$\Delta P/\Delta x$
Osmosis inversa	L	L	$\Delta P/\Delta x$
Diálisis	L	L	$\Delta c/\Delta x$
Electrodiálisis	L	L	$\Delta E//\Delta x$
Pervaporación	L	G	$\Delta p//\Delta x$
Separación gases	G	G	$\Delta p//\Delta x$

# Clasificación según la fuerza impulsora

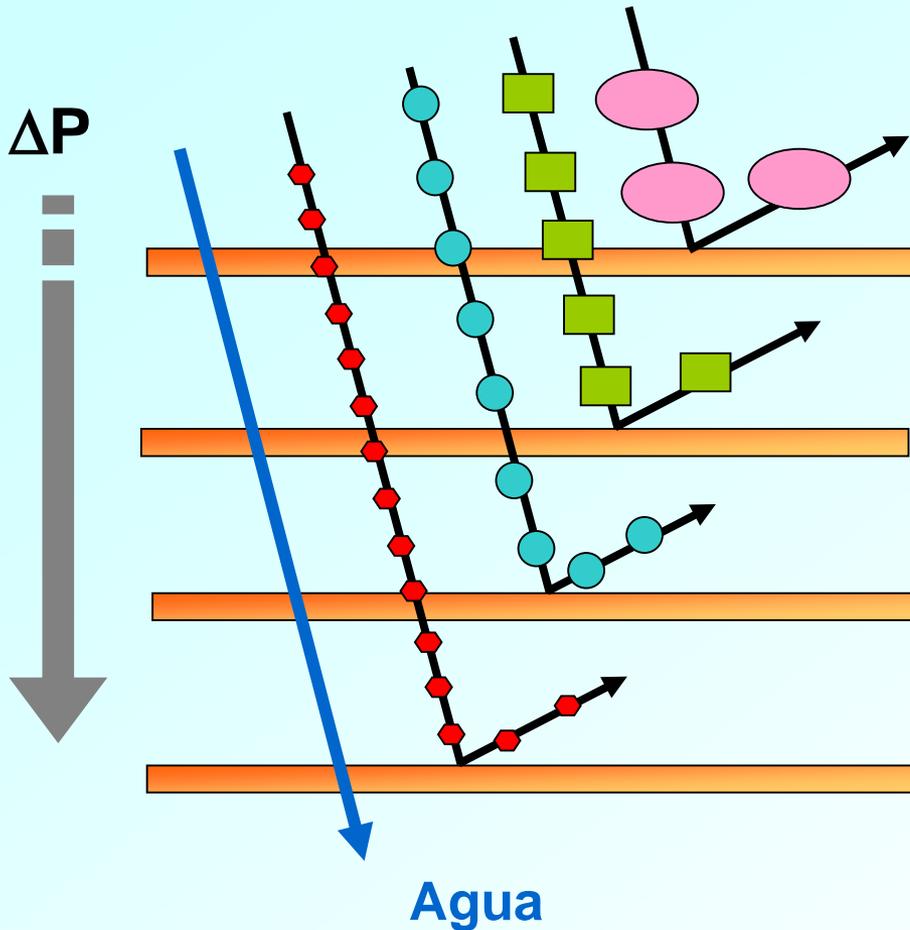
## ❑ Operaciones de Presión

Operaciones donde la fuerza impulsora es una diferencia de presión a través de la membrana.

**PROCESOS:** MF, UF, NF y OI

TECNOLOGIA DE MEMBRANA	TAMAÑO DE PORO ( $\mu\text{m}$ )	PRESIÓN DE TRABAJO (bar)	J ( $\text{L h}^{-1} \text{m}^{-2}$ )
MICROFILTRACIÓN	0,1 - 10	0,5 – 2	> 200
ULTRAFILTRACIÓN	0,005 – 0,05	0,5 – 5	5 - 200
NANOFILTRACIÓN	0,0005 – 0,005	5 – 15	5 - 80
ÓSMOSIS INVERSA	< 0.001	5 – 80	5 - 50

# Operaciones de Presión



**Microfiltración (0,1 a 10  $\mu\text{m}$ )**

**Bacterias, sólidos en suspensión**

**Ultrafiltración (0,05 a 0,005  $\mu\text{m}$ )**

**Macromoléculas, pigmentos**

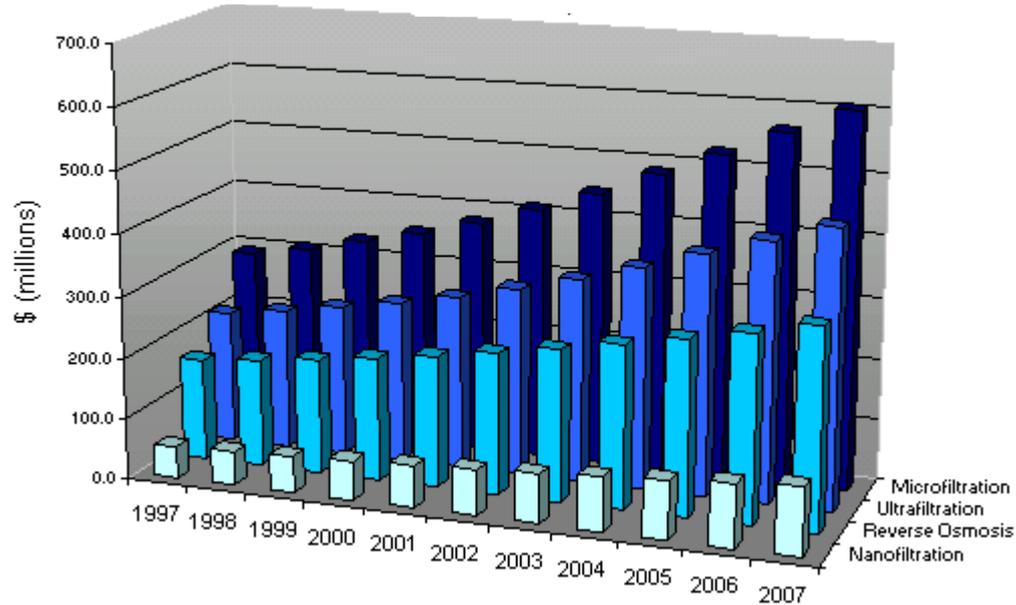
**Nanofiltración (0,005 a 0,0005  $\mu\text{m}$ )**

**Azúcares, lactosa, iones polivalentes**

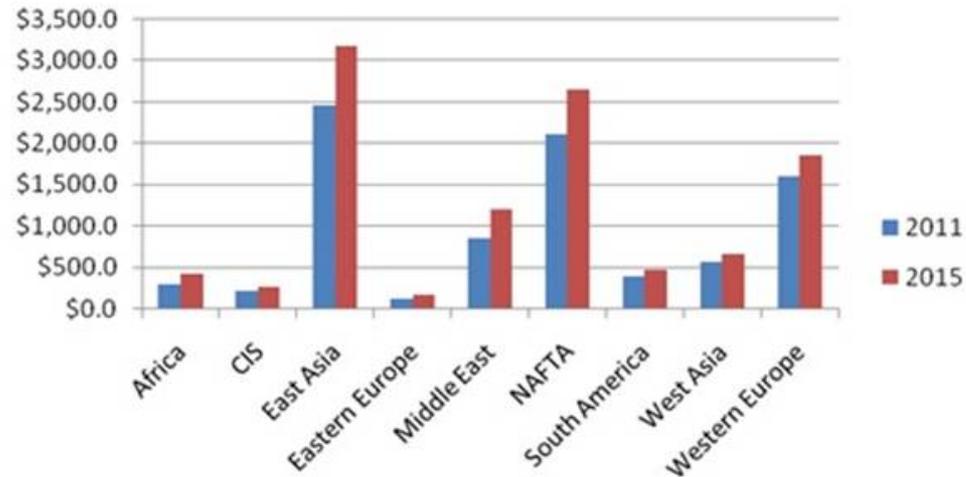
**Ósmosis inversa (0,001 a 0,0001  $\mu\text{m}$ )**

**Sales, iones, minerales**

### Mercado de los procesos de membranas (Europa)



### Mercado procesos de membranas (millones \$/año)



# GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANA

## ÍNDICE

- ⇒ **Introducción**
- ⇒ **Clasificación de los procesos de membrana**
- ⇒ **Principales procesos de membranas**
- ⇒ **Parámetros característicos**
- ⇒ **Membranas y módulos**
- ⇒ **Ensuciamiento y limpieza de las membranas**

# Parámetros característicos

**Umbral de corte molecular:** peso molecular del soluto que es retenido en un 90% por la membrana (unidad: Dalton = g/mol)

$$\text{Densidad de flujo de permeado (J)} = \frac{Q_p}{\text{Área}}$$

$$\text{Rechazo(\%)} = \frac{C_a - C_p}{C_a} \cdot 100$$

$$\text{Conversión(\%)} = \frac{Q_p}{Q_a} \cdot 100$$

$$\text{Factor de reducción de volumen (FRV)} = \frac{Q_R}{Q_A}$$

$$\text{Factor de concentración} = \frac{C_R}{C_A}$$

# ÍNDICE

- ⇒ **Introducción**
- ⇒ **Clasificación de los procesos de membrana**
- ⇒ **Principales procesos de membranas**
- ⇒ **Parámetros característicos**
- ⇒ **Membranas y módulos**
- ⇒ **Ensuciamiento y limpieza de las membranas**

# Clasificación de las membranas

- ❑ Atendiendo a la **naturaleza química** de la capa activa
  - Orgánicas o poliméricas
  - Inorgánicas
  
- ❑ Atendiendo a la **estructura de la sección transversal**
  - Simétricas
  - Asimétricas
    - Integrales
    - Compuestas
  
- ❑ Atendiendo a su **geometría o configuración**
  - Planas
  - Tubulares ( $\phi_{in} > 2 \text{ mm}$ )
  - Capilares ( $\phi_{in} = 0.025 - 2 \text{ mm}$ )

# Las membranas orgánicas sintéticas

Están basadas en polímeros de síntesis.

Los más utilizados son:

<b>POLÍMEROS</b>	<b>MF</b>	<b>UF</b>	<b>NF</b>	<b>OI</b>	<b>SG</b>	<b>PV</b>	<b>D</b>
<b>ÉSTERES DE CELULOSA (AC, TAC)</b>	X	X	X	X	X	X	X
<b>POLIAMIDAS AROMÁTICAS (PA)</b>	X	X	X	X			X
<b>POLIBENZIMIDAZOL (PBI)</b>				X			
<b>POLIBENCIMIDIAZOLONA (PBIL)</b>				X			
<b>POLISULFONA (PS)</b>	X	X			X		X
<b>POLIIMIDA (PI)</b>		X		X			
<b>POLIETERIMIDA (PEI)</b>	X	X					
<b>POLIACRILONITRILO (PAN)</b>		X					X
<b>POLIDIMETILSILOXANO (PDMS)</b>					X	X	
<b>POLITETRAFLUORETILENO (PTFE)</b>	X						

# Las membranas inorgánicas

Se caracterizan por poseer una **gran estabilidad química, mecánica y térmica**, sensiblemente mayor que las poliméricas.

Sin embargo son más **frágiles** y sensiblemente **más caras**.

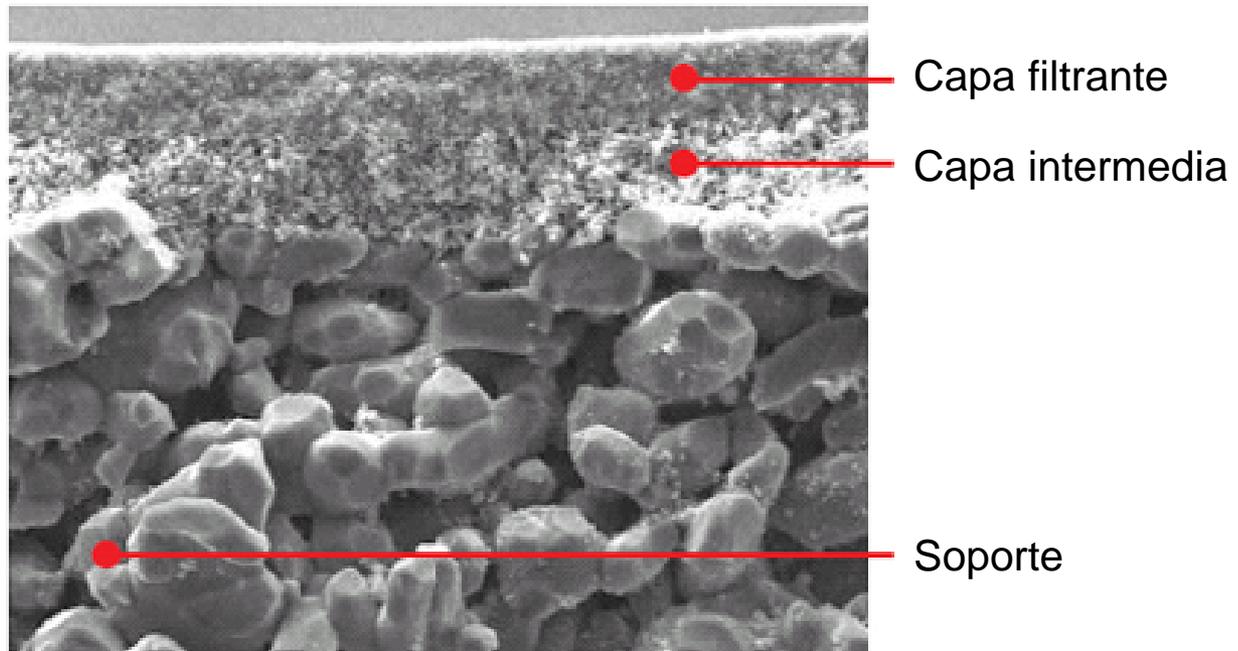
Se pueden distinguir tres tipos diferentes de membranas: metálicas, cerámicas y de vidrio. **Las cerámicas son las más utilizadas**.

<b>METÁLICAS</b>	Sinterizado de polvos metálicos	W, Mo, Ni, Fe, Al, Pt, Cu, Ag, Au
<b>DE VIDRIO</b>	Sol- Gel Prensado	óxidos de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y aditivos (boro, fósforo, sodio, etc.)
<b>CERÁMICAS</b>	Combinación de un metal con un no-metal (sinterizado, Sol-Gel, anodizado)	Metal (Al, Ti o Zr) Óxido metálico ( $\alpha$ ó $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{ZrO}_2$ )

# Las membranas cerámicas

UF y MF

- ✓ óxidos de Zr
- ✓ óxidos de Al
- ✓ óxidos de Ti



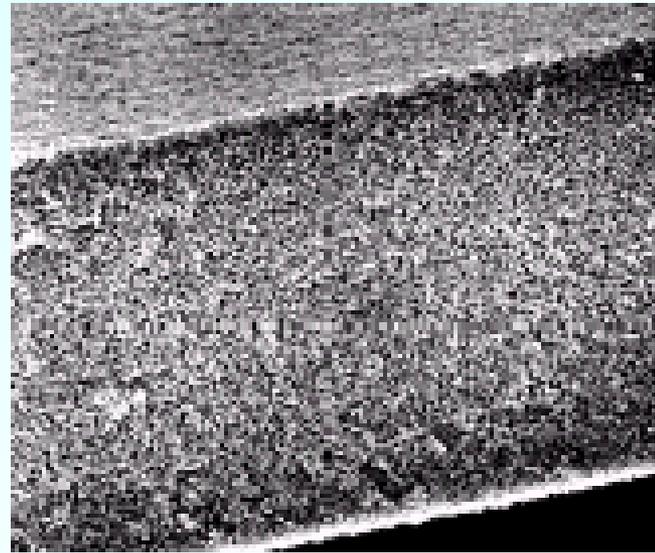
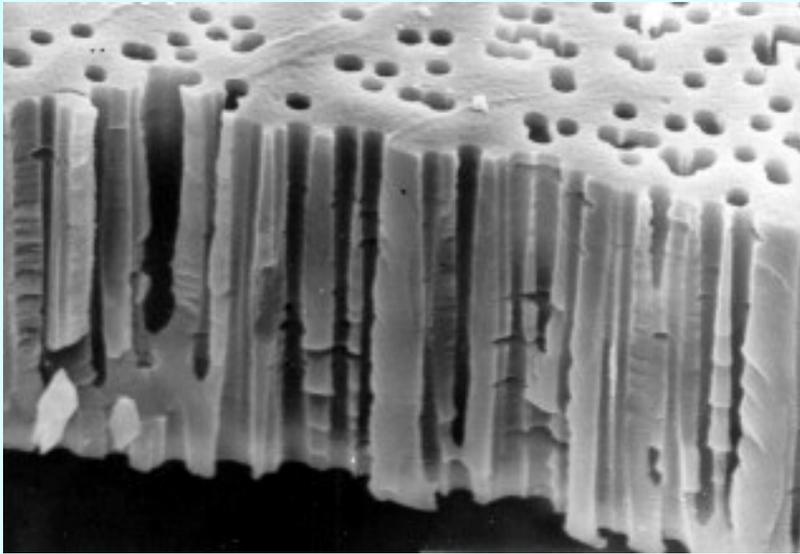
Membrana de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  de Membralox (x1010)



# Clasificación según la estructura de la membrana

- Membranas simétricas

- Estructura de poro **isotrópica**

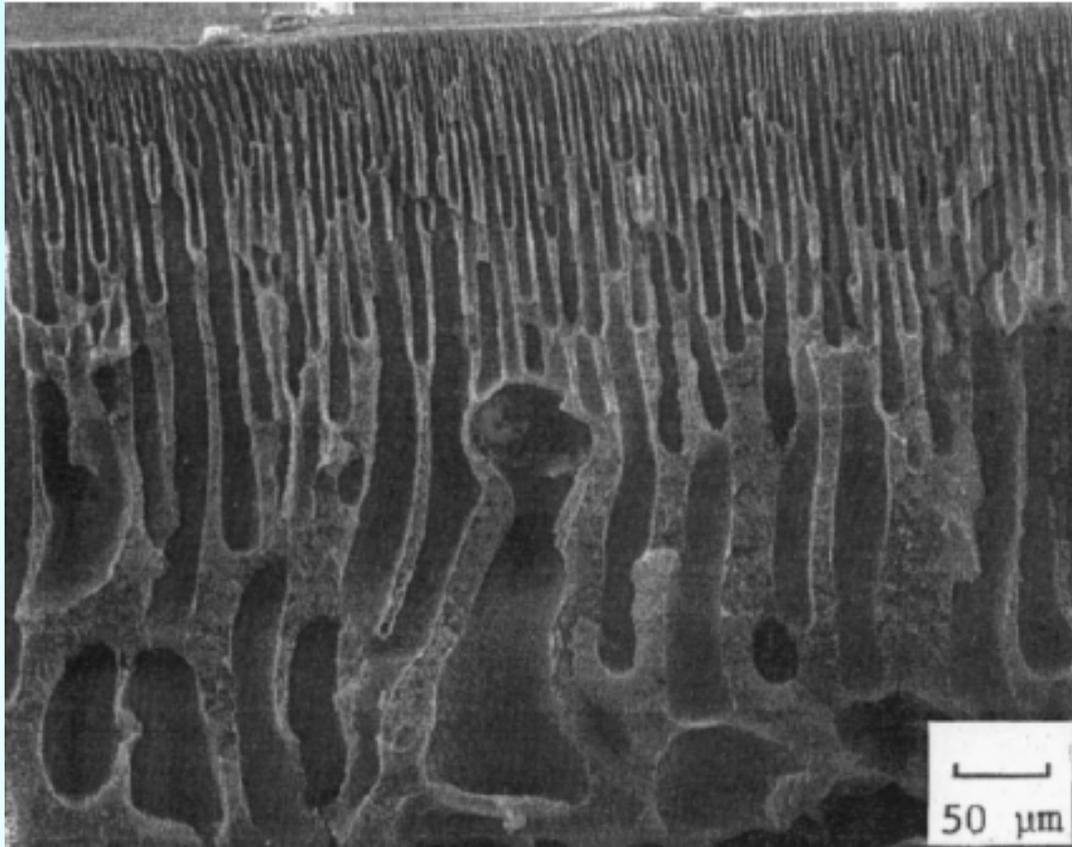


**PROCESOS: MF, UF y DIALISIS**



# Clasificación según la estructura de la membrana

- Membranas asimétricas integrales



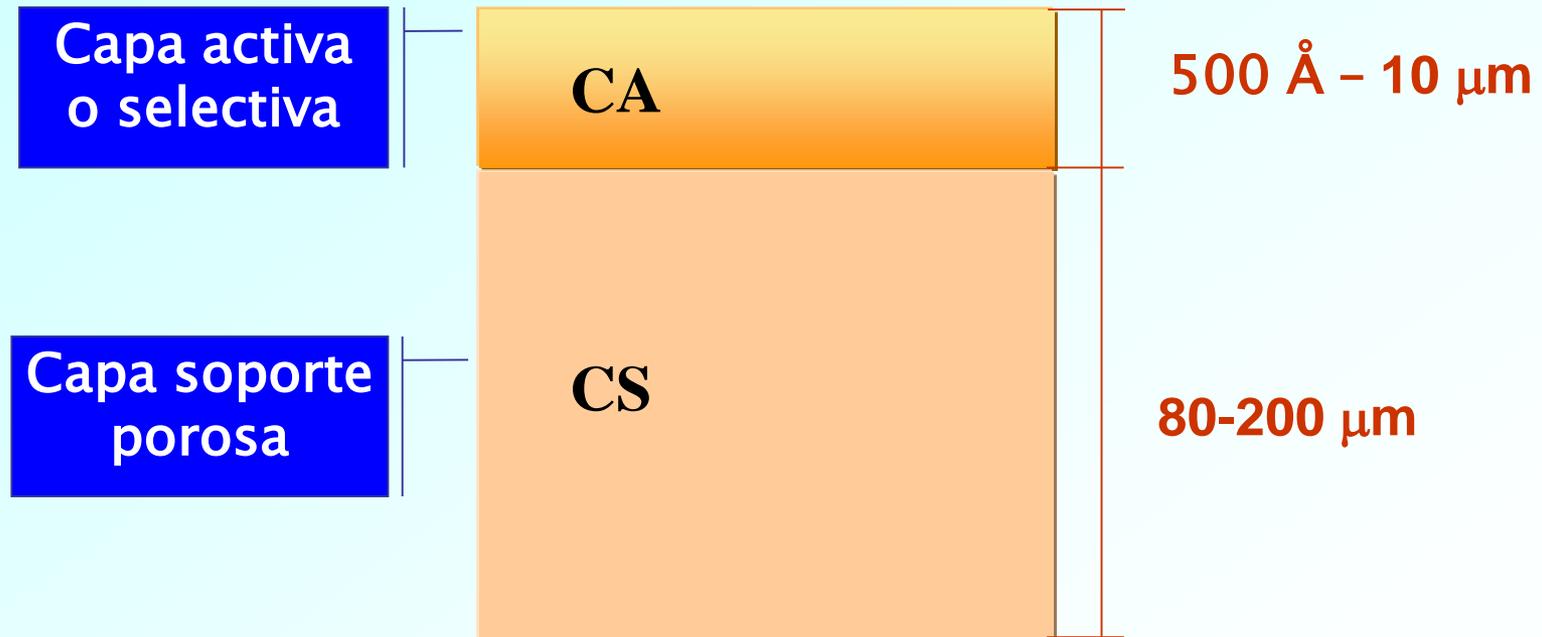
Membrana de UF de polipropileno

PROCESOS: MF y UF



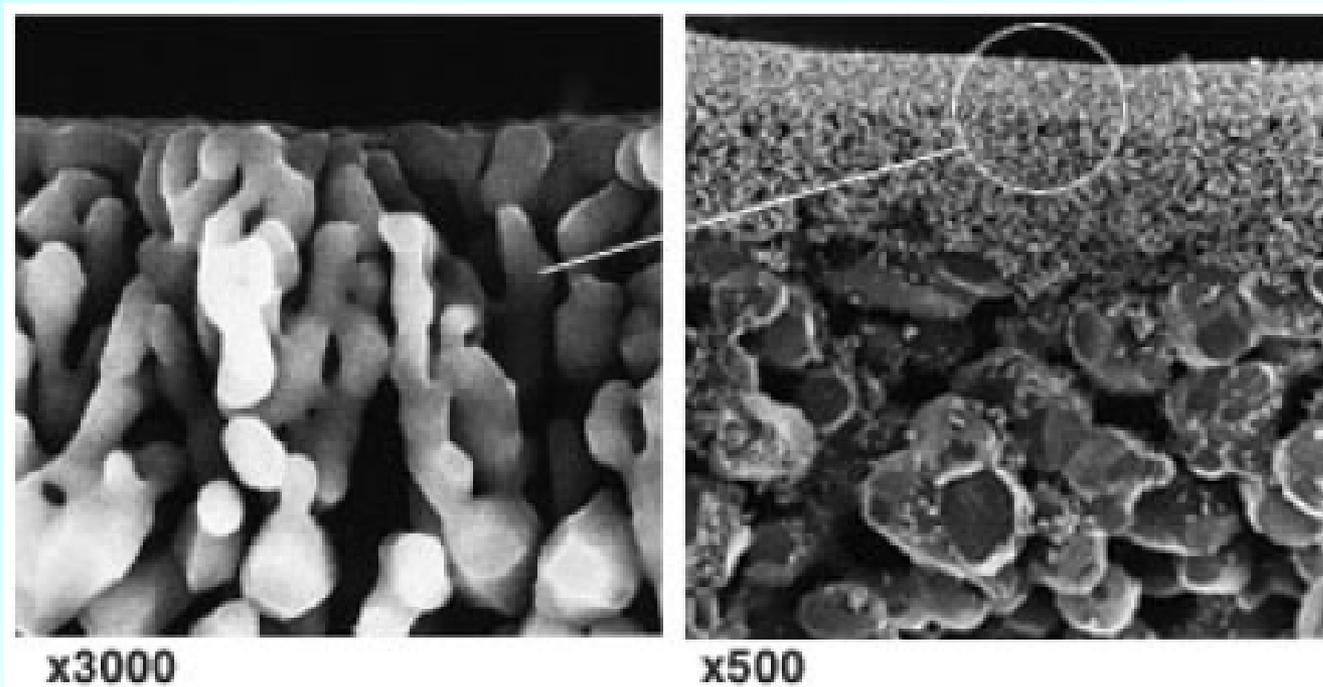
# Clasificación según la estructura de la membrana

## ESTRUCTURA GENERAL DE UNA MEMBRANA COMPUESTA



# Clasificación según la estructura de la membrana

- Membranas asimétricas compuestas



Membrana de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (Membralox)

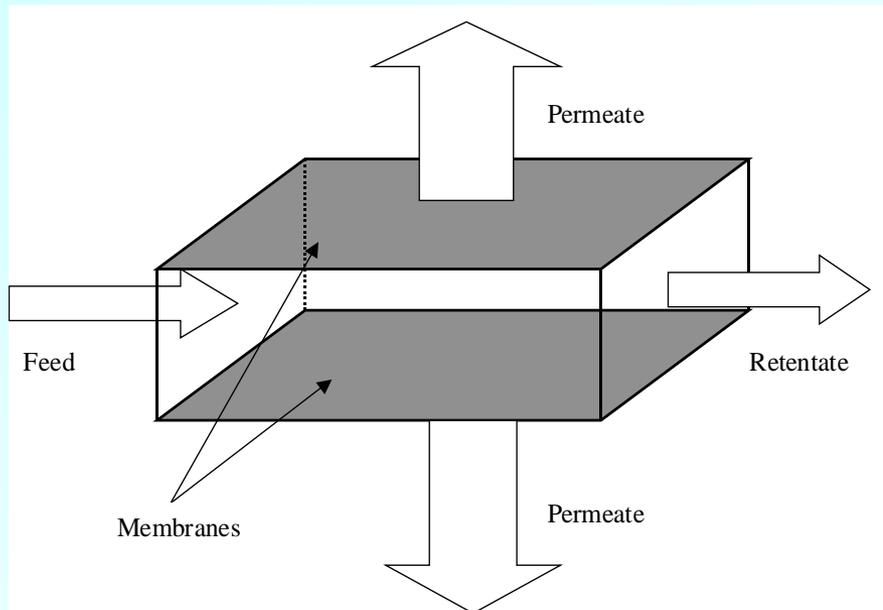
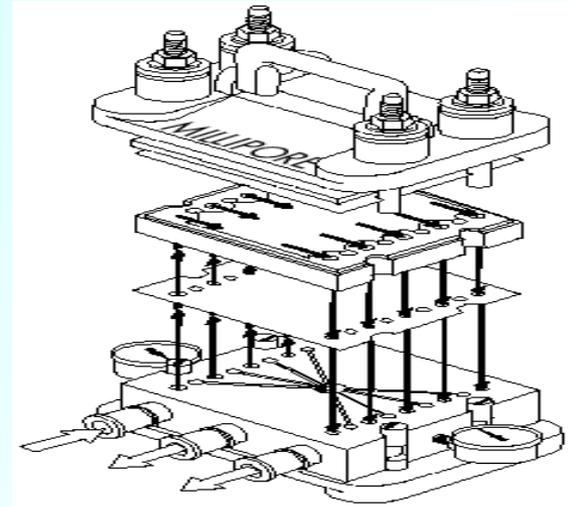
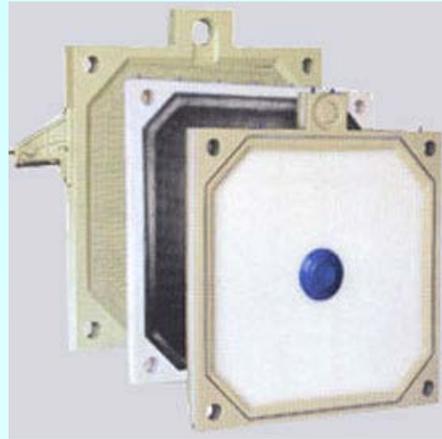
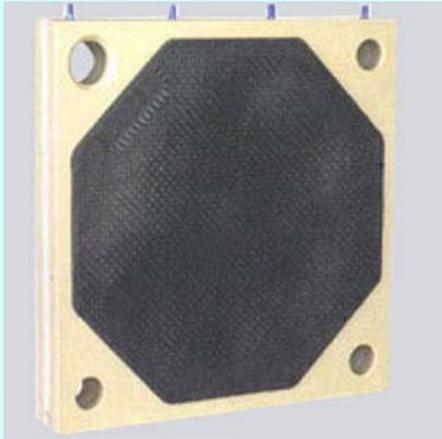
PROCESOS: NF, OI, SG y PV



# Configuraciones y módulos de membranas

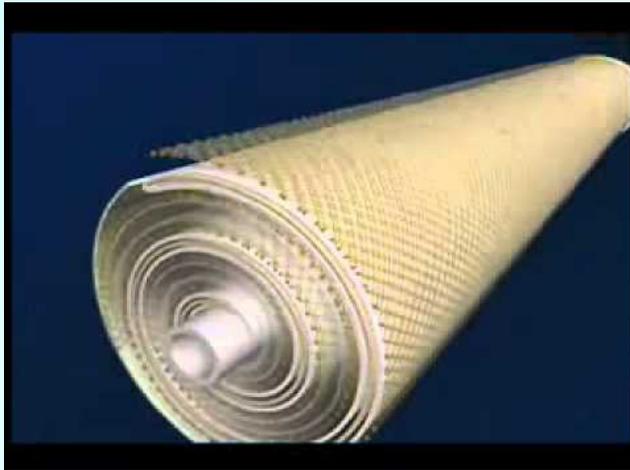
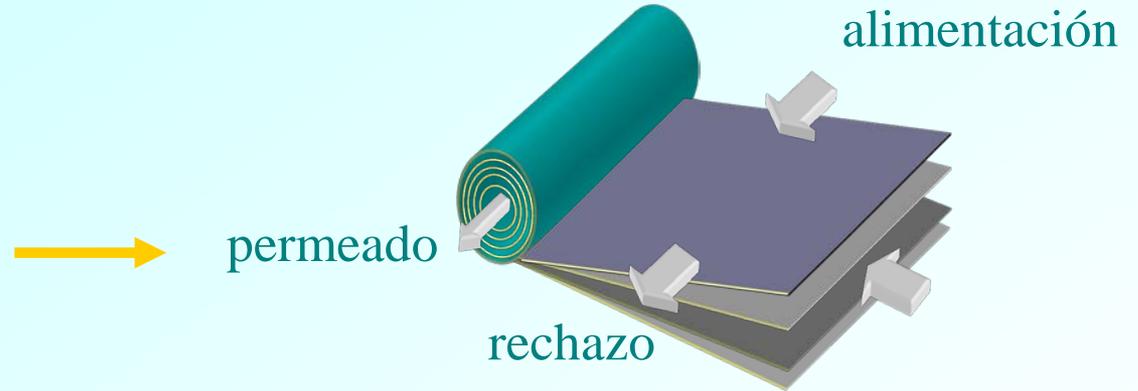
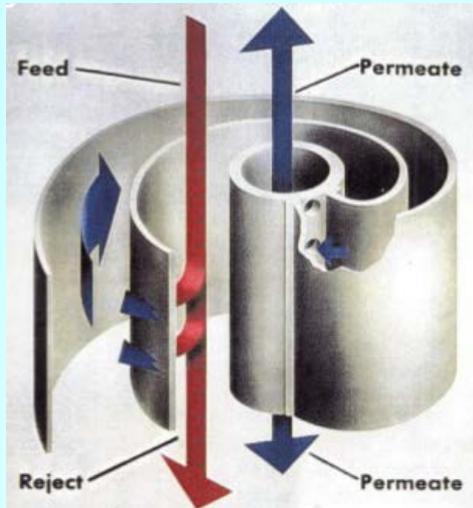
- **Configuración:** Forma geométrica dada a la membrana
  - Plana
  - Tubular ( $\phi_{in} > 2 \text{ mm}$ )
  - Capilar ( $\phi_{in} = 0.025 - 2 \text{ mm}$ )
- **Módulo:** Dispositivo que actúa de soporte de una o varias membranas (carcasa)
  - Placas y marcos
  - Espiral
  - Tubular
  - Fibras huecas

# Módulos de placas y marcos

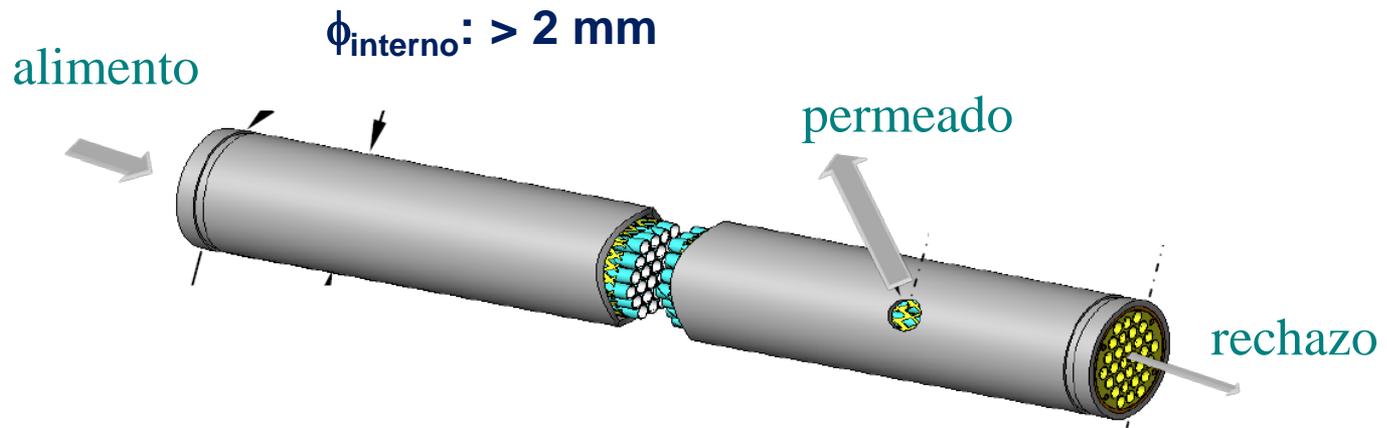


- **Se pueden montar y desmontar fácilmente**
- **Poca área de membrana por unidad de volumen de módulo**
- **Fueron los primeros desarrollados**

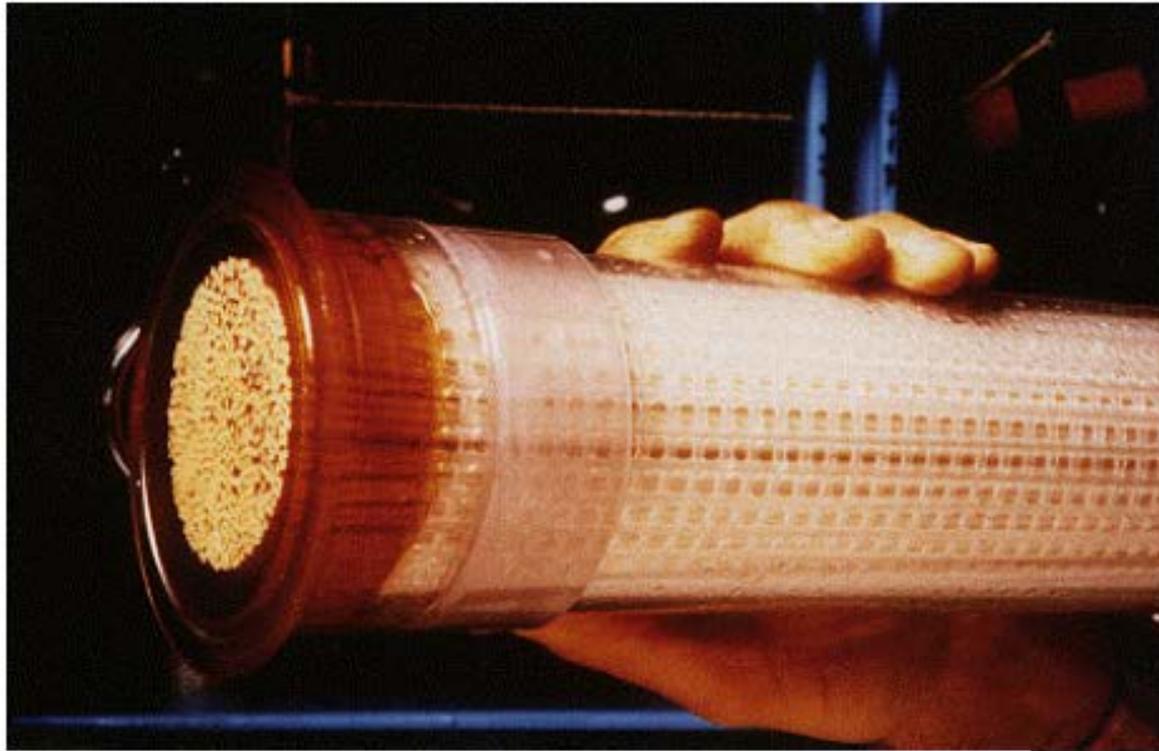
# Módulo de arrollamiento en espiral



# Módulos tubulares



# Módulos de fibras huecas



$$\phi_{in} = 0.025 - 2 \text{ mm}$$



# Módulos de fibras huecas



# GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANA

## ÍNDICE

- ⇒ **Introducción**
- ⇒ **Clasificación de los procesos de membrana**
- ⇒ **Principales procesos de membranas**
- ⇒ **Parámetros característicos**
- ⇒ **Membranas y módulos**
- ⇒ **Ensuciamiento y limpieza de las membranas**

# Causas del ensuciamiento de las membranas

- **Adsorción de moléculas de soluto** sobre la superficie de la membrana debido a afinidades químicas.
- **Taponamiento de los poros de la membrana**, tanto a nivel superficial como en el interior de los mismos, debido a que el tamaño de las moléculas de soluto es similar al de los poros de la membrana .
- **Formación de capa gel**, debida al establecimiento de una red tridimensional entre las macromoléculas de soluto y el disolvente. 
- **Formación de depósitos en la superficie de la membrana** o en el interior de la misma por precipitación de las moléculas de soluto o deposición de materia en suspensión

## Consecuencias del ensuciamiento de las membranas

- **Disminución de la densidad de flujo de permeado** (productividad).
- **Cambios en la selectividad** de la membrana (rechazo) .
- **Aumento de la caída de presión** en el módulo de membranas.

# Clasificación de los métodos de limpieza

**FÍSICOS**

**QUÍMICOS**

# Métodos físicos de limpieza de membranas

- Son realmente métodos de control del ensuciamiento
- No son tan eficaces como los métodos químicos
- Evitan el uso de reactivos y con ello la generación de residuos y el deterioro de la membrana
- Ejemplos:
  - Retroflujo (backpulsing)
  - Promotores de turbulencias, etc.
  - Pulsos de campo eléctrico
  - Limpieza con ultrasonidos

# Métodos químicos de limpieza de membranas (I)

Utilizan productos químicos para la limpieza de las membranas

- **Limpieza ácida**: Para eliminar precipitados inorgánicos
  - Ácido acético (a pH 3-4)
  - Ácido clorhídrico al 0.1 %
  - Ácido fosfórico al 0.4 %
  - Ácido cítrico al 1 %
  - Ácido nítrico al 0.2 %
- **Limpieza alcalina**: Para ensuciamiento por materia orgánica
  - Hidróxido sódico (a pH al menos 11). Se puede añadir:
    - Tripolifosfato sódico (STTP)
    - Ácido etilendiaminotetracético (AEDT)
    - Fosfato trisódico (TSP)
- **Desinfectantes**: Para ensuciamientos biológicos
  - Productos biocidas
  - Peróxido de hidrógeno al 2.5 %
  - NaOCl

# Métodos químicos de limpieza de membranas (II)

Utilizan productos químicos para la limpieza de las membranas

- **Ajentes complejantes**: Reducen la dureza del agua, ayudan a mantener los depósitos en suspensión
  - Tripolifosfato sódico (STTP)
  - Ácido etilendiaminotetracético (AEDT)
  - Fosfato trisódico (TSP)
- **Tensioactivos**: Favorecen la eliminación de especies poco solubles en agua
- **Enzimas**: Para eliminación de algunos compuestos orgánicos
  - Proteasas
  - Lipasas
- **Otros aditivos**:
  - Antiespumantes
  - Inhibidores de corrosión

¿Cuándo se debe efectuar la limpieza química?

## PLANTA DE DESALACIÓN DE AGUA POR OI

- Reducción del flujo de permeado en un **10 -15 %**
- Aumento de la salinidad en el permeado en un **10 – 15 %**
- Aumento en la pérdida de carga en **1.5 veces** el valor inicial

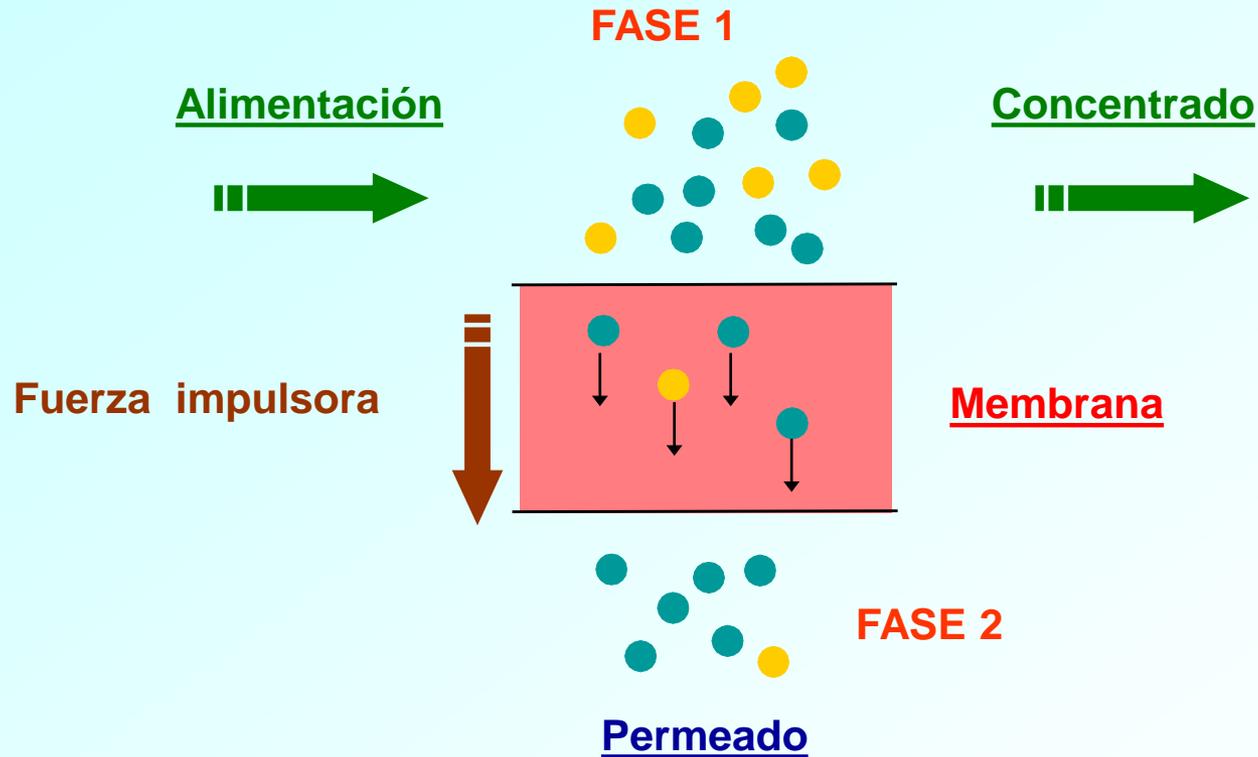


**Fin de la Presentación**

# Equipo de lavado



# Concepto de membrana semipermeable



Rechazo

$$R(\%) = \frac{C_a - C_p}{C_a} \cdot 100$$

Densidad de flujo de permeado

J (L/h m<sup>2</sup>)

# Procesos impulsados por un gradiente de concentración: Diálisis

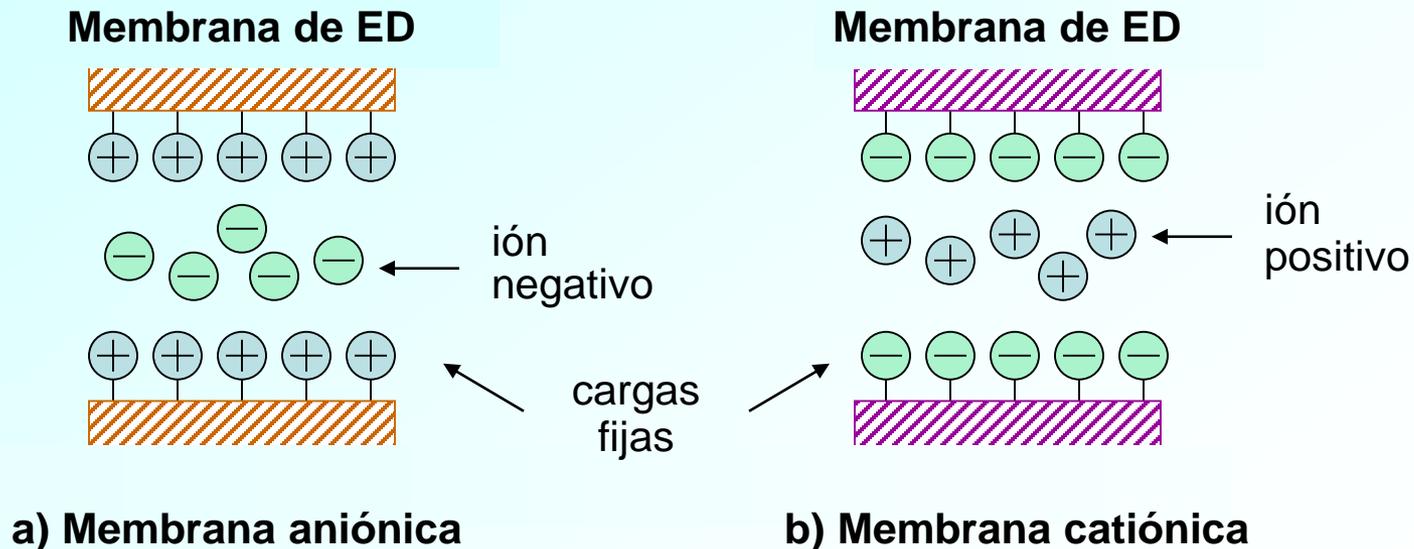
- Aparece en los años 70
- Escaso interés industrial
- Separación de iones y especies de reducido peso molecular ( $< 100$  Da)
- Se utilizan membranas iónicas
- Proceso lento y poco selectivo
- Aplicaciones:
  - **Riñón artificial**
  - Recuperación de NaOH en la industria textil
  - Eliminación de alcohol en la cerveza
  - Eliminación de sales en la industria farmacéutica

# Procesos impulsados por un gradiente de potencial eléctrico: Electrodiálisis

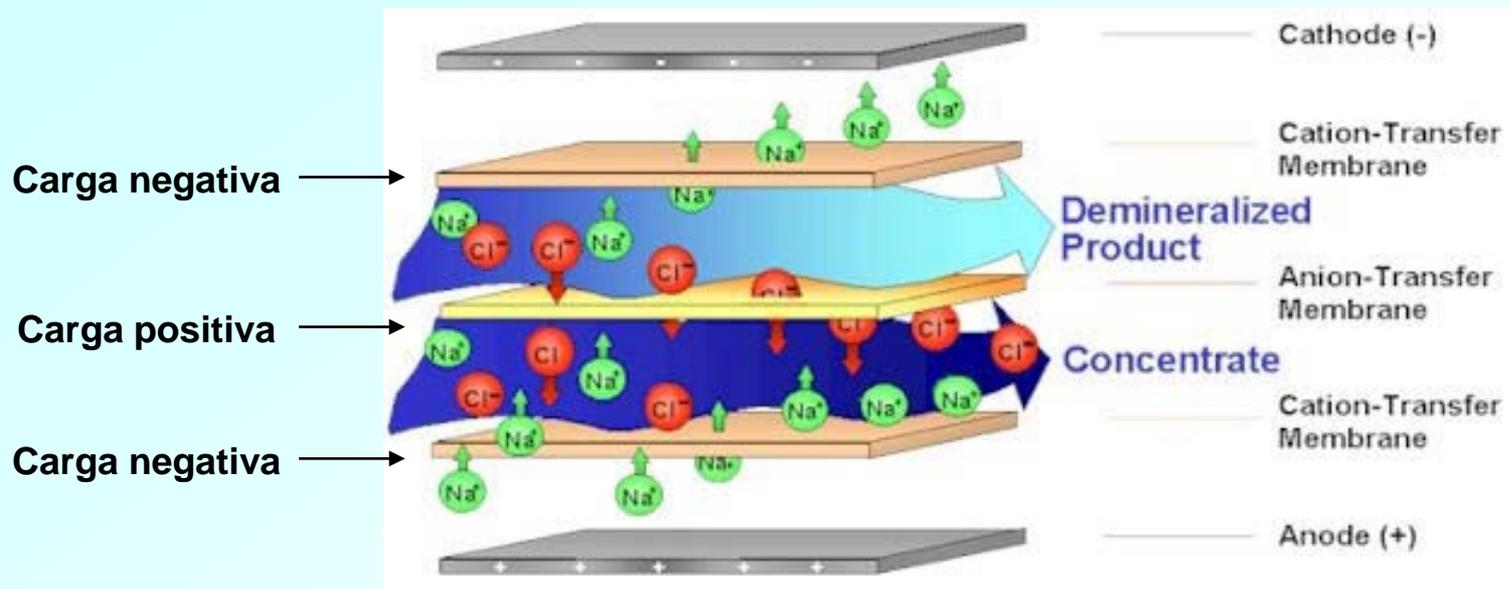
## Objeto

Reducir el contenido iónico de una disolución mediante:

- Diferencia de potencial eléctrico.
- Membranas de intercambio iónico.



# Procesos impulsados por un gradiente de potencial eléctrico: Electrodiálisis

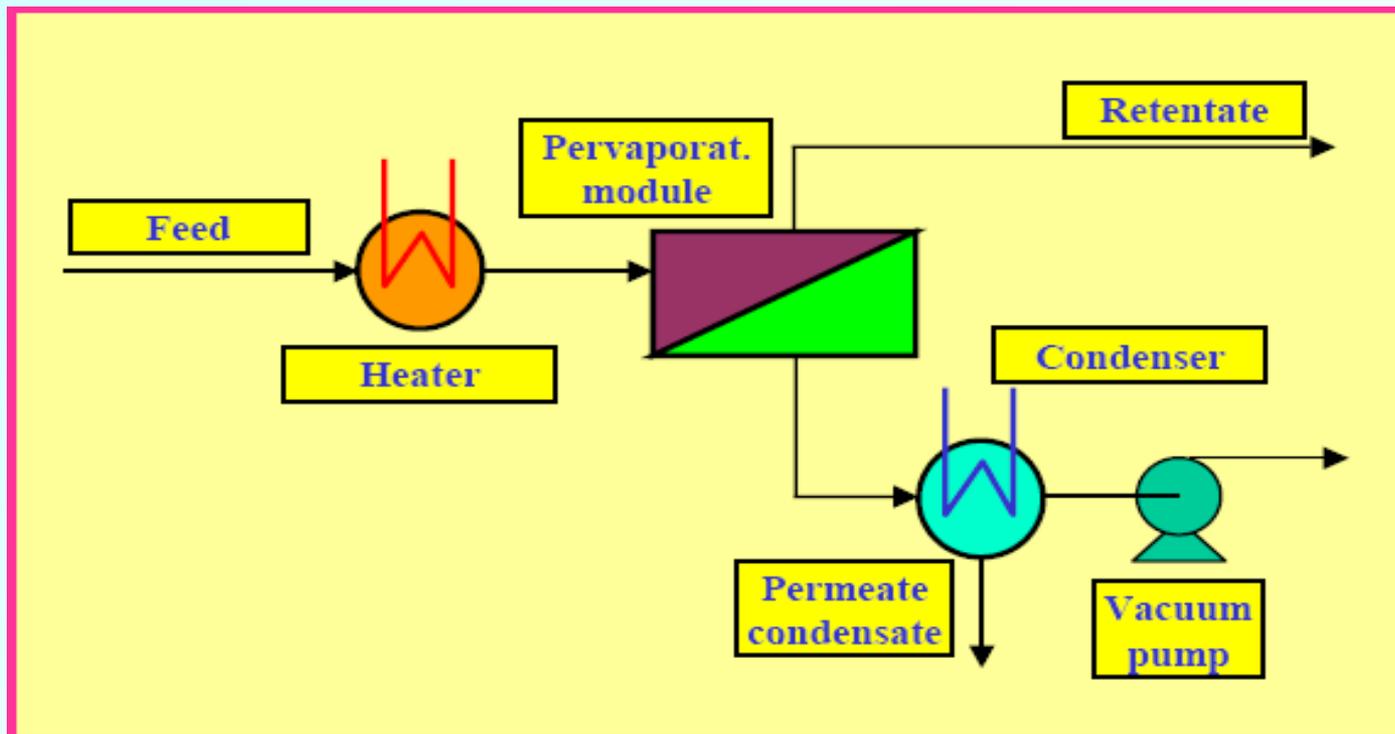


# Procesos impulsados por un gradiente de potencial eléctrico: Electrodiálisis

- Aparece en los años 30
- Se utiliza para la separación de iones
- Se utilizan membranas iónicas (no porosas)
- Gradiente de potencial eléctrico del orden de 1-2 V
- Aplicaciones:
  - Desalación de agua de mar
  - Ablandamiento de agua
  - Eliminación de nitratos
  - Desmineralización de lactosa
  - Eliminación de ácidos en zumos
  - Eliminación de tartrato de vinos
  - Eliminación de metales pesados
  - Producción de cloro e hidróxido de sodio

# Procesos impulsados por un gradiente de presión parcial: Pervaporación

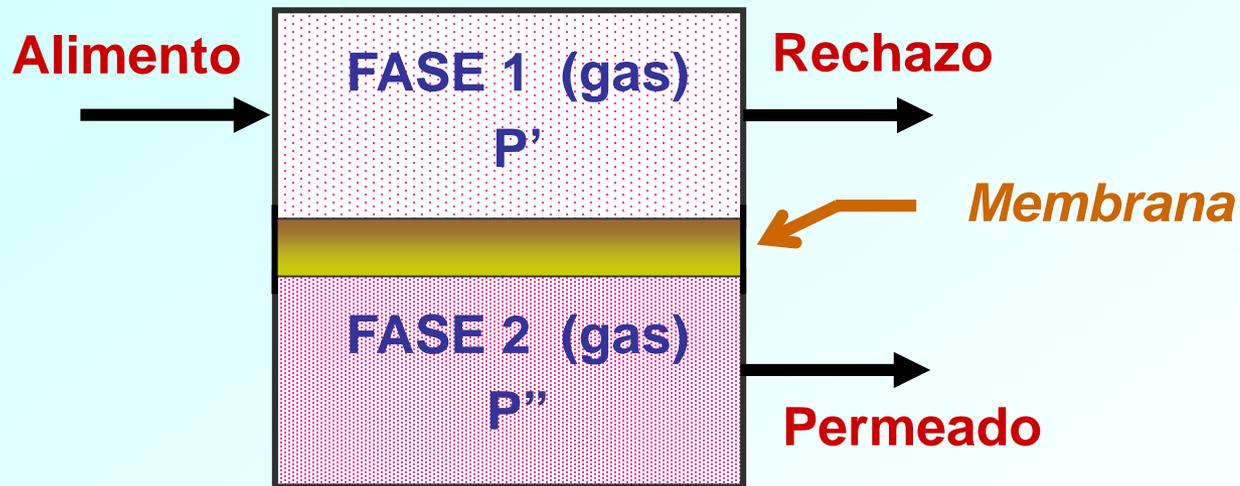
Esquema general de un proceso de pervaporación



# Procesos impulsados por un gradiente de presión parcial: Pervaporación

- Aparece en el año 1917
- Se produce un cambio de fase
- Se utilizan membranas no porosas
- Densidad de flujo de permeado reducida
- Aplicaciones limitadas:
  - Deshidratación de compuestos orgánicos
  - Recuperación de compuestos orgánicos con concentraciones reducidas
  - Separación de mezclas azeotrópicas

# Procesos impulsados por un gradiente de presión parcial: Permeación de gases



$p' > p''$       Permeación de gases      (G-G)

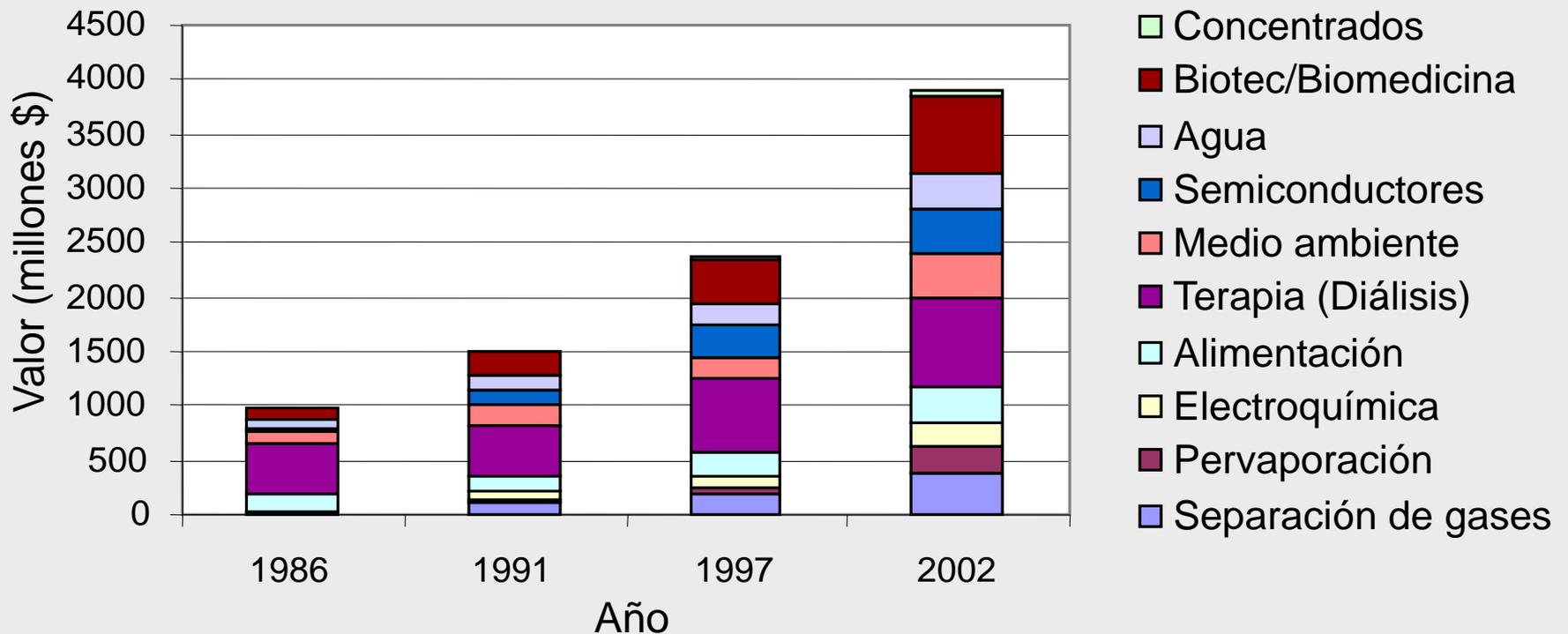
$p' > p''$       Pervaporación      (L-V)

# Procesos impulsados por un gradiente de presión parcial: Permeación de gases

- Aparece en los años 50
- Utiliza membranas porosas y no porosas
- Presiones de hasta 100 bar
- Aplicaciones:
  - Petroquímica
    - Purificación de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e hidrocarburos gaseosos
  - Enriquecimiento, purificación y deshidratación de N<sub>2</sub>
  - Ajuste de la relación H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> en el gas de síntesis
  - Recuperación de He de gas natural u otras fuentes
  - Eliminación de VOC de corrientes de proceso

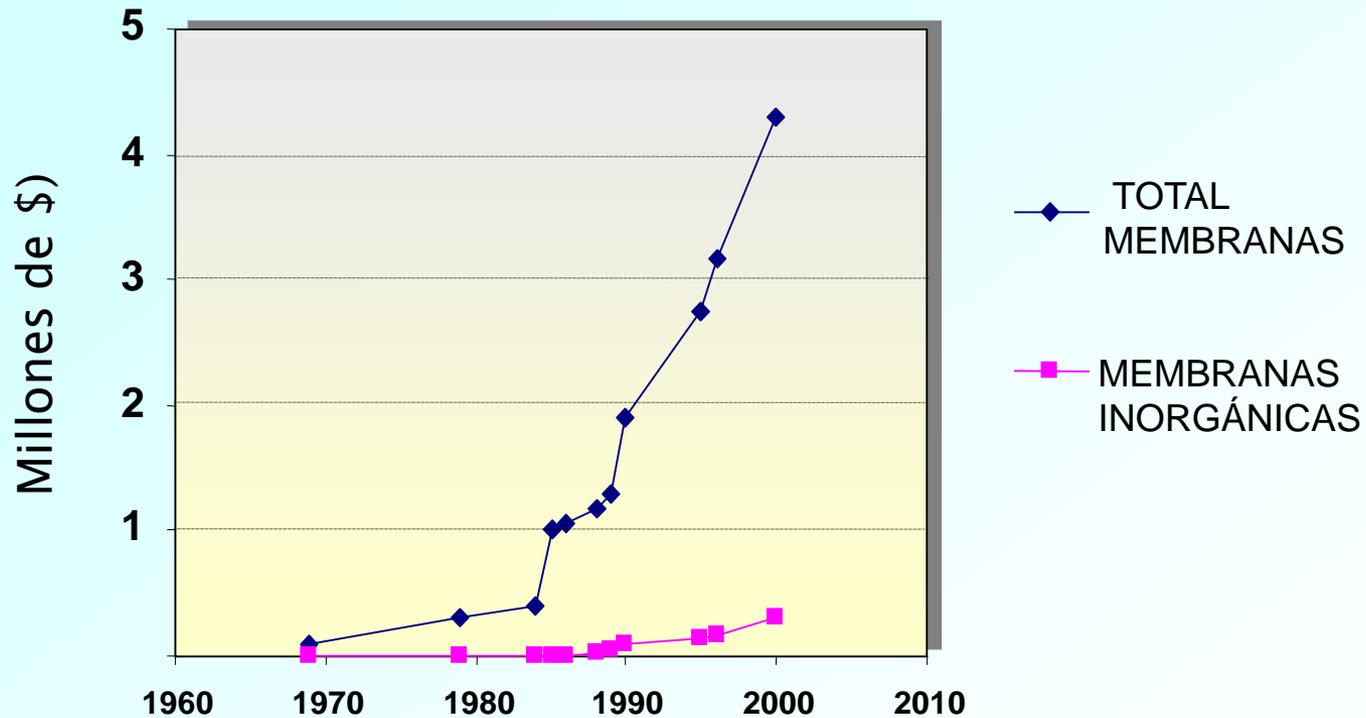
# Evolución mundial del mercado

Las ventas de membranas y módulos en el 2002 se estiman en más de 4400 millones de \$, repartidos en diferentes procesos.



# Situación actual del mercado a nivel mundial

## MERCADO MUNDIAL DE MEMBRANAS EN FUNCION DEL TIPO DE MATERIAL



Actualmente las membranas orgánicas superan con creces en venta a las membranas inorgánicas

## Ventajas de las membranas inorgánicas

- Mayor estabilidad térmica, mecánica y química.

La elevada resistencia térmica aumenta sus posibilidades de trabajo, p.e. en el caso de filtración de líquidos.

Ya que el aumento de la temperatura permite:

- obtener mayores flujos de permeado
- trabajar a mayor concentración y viscosidad (mayor solubilidad).
- aumentar la vida media de las membranas (el lavado a alta temperatura es mucho más eficaz).

## Desventajas de las membranas inorgánicas

- Son muy frágiles y más caras.

Su principal campo de aplicación esta limitado a la industria química y a la industria farmacéutica y agroalimentaria:

- Tratamiento de fluidos agresivos
- Separaciones a elevada temperatura

De todos los tipos las MEMBRANAS CERÁMICAS son las más utilizadas

# Clasificación de los procesos de membrana

Los procesos de membranas se caracterizan por usar **una membrana** para llevar a cabo una separación específica.

La membrana transporta más fácilmente un componente que otro debido a diferencias entre las propiedades **físico-químicas** de las membranas y las especies permeantes.

Sin embargo, los procesos de membrana se pueden clasificar atendiendo a diferentes aspectos de la separación:

- **La fuerza impulsora que actúa**
- **Mecanismo por el que se produce la separación**
- **Naturaleza química de la capa activa de la membrana**
- **Estructura de la sección transversal**

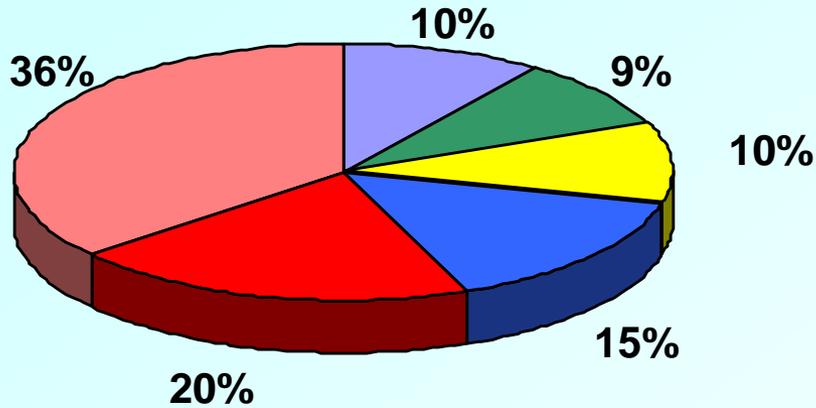
# Comparación de los procesos impulsados por presión

## PRESIÓN DE TRABAJO Y DENSIDAD DE FLUJO DE PERMEADO

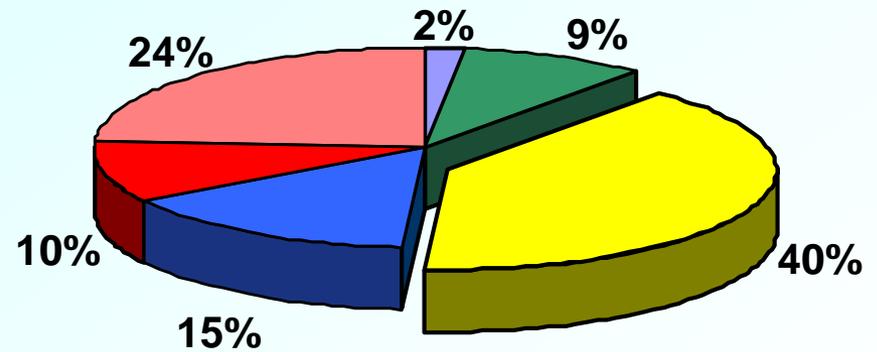
PROCESO	MF	UF	NF	OI
PRESIÓN (bar)	0,5 - 2	0,5 - 5	5 - 15	5 - 80
J (L/m <sup>2</sup> h)	> 200	5 – 200	5 – 80	5 - 40

# Situación actual del mercado por técnicas de membrana

**MUNDIAL**  
4400 MM \$ (AÑO 2006)



**ESPAÑA**  
150 MM \$ (AÑO 2006)

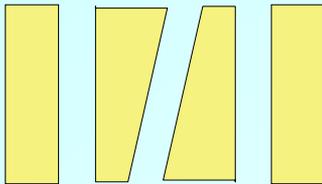


- |   |   |
|---|---|
|  SEPARACIÓN DE GASES |  ELECTRODIÁLISIS |
|  ÓSMOSIS INVERSA     |  ULTRAFILTRACIÓN |
|  DIÁLISIS            |  MICROFILTRACIÓN |

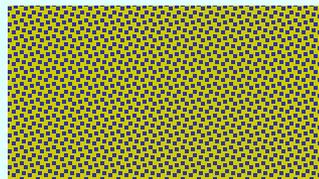
# Clasificación según la estructura de la membrana

Según su morfología, se pueden distinguir dos tipos de membranas:

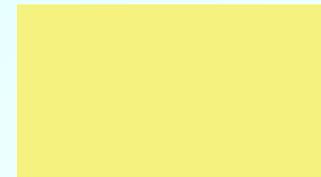
## MEMBRANAS SIMÉTRICAS



POROS CILÍNDRICOS

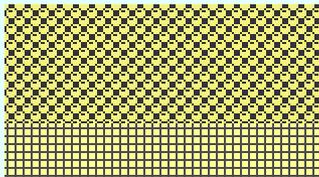


POROSA

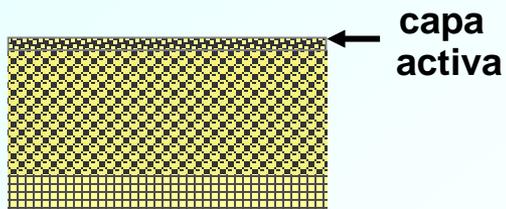


DENSA

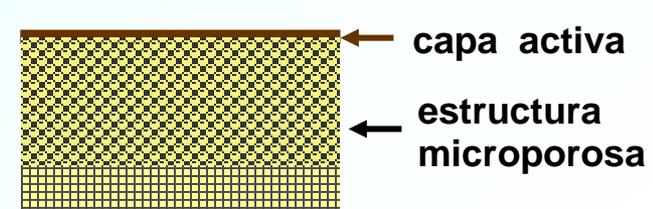
## MEMBRANAS ASIMÉTRICAS



POROSA



POROSA CON  
CAPA ACTIVA



COMPUESTA

# Comparación de los módulos de membranas

Parámetro	Módulo			
	Plano	Espiral	Tubular	Fibras huecas
Área específica	Reducida	Moderada	Reducida	Elevada
$\phi_{\text{interno}}$ o espesor (mm)	4-20	4-20	20-50	0.5-2
Velocidad lineal (cm/s)	25-50	25-50	100-500	0.5
Régimen de flujo	Laminar-turbulento	Laminar	Turbulento	Laminar-turbulento
Pérdida de presión (bar)	2-3	1-2	1-2	0.3
Facilidad de bloqueo	Media	Media	Reducida	Elevada
Pretratamiento	Medio	Medio	Sencillo	Intenso
Reemplazamiento	Fácil	Difícil	Fácil	Imposible
Características especiales	Fácil de desmontar y limpiar	No para membranas inorgánicas	Flujo fácil de caracterizar	Susceptible al bloqueo de las fibras

# Comparación de los módulos de membranas

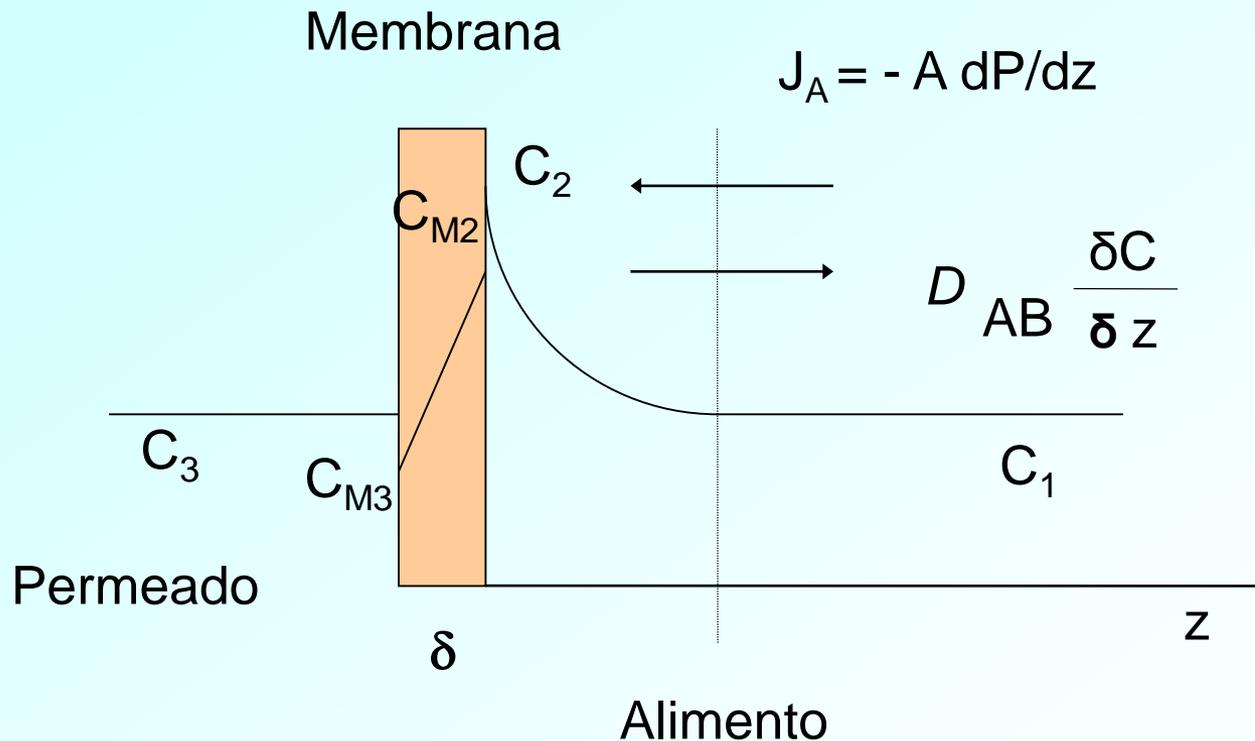
Operación	Módulo		
	Tubular	Espiral	Fibras huecas
Ósmosis inversa	A	MA	MA
Ultrafiltración	MA	A	NA
Microfiltración	MA	NA	NA
Pervaporación	A	MA	MA
Permeación de gases	NA	MA	MA

**A: Apropiado; MA: Muy apropiado; NA: No apropiado**

# FORMAS DE REDUCIR LA CONCENTRACIÓN POR POLARIZACIÓN Y EL ENSUCIAMIENTO

- Trabajando con **concentraciones reducidas** en la alimentación
- Favoreciendo la **retrodifusión** de solutos:
  - Trabajando a baja presión (u otra fuerza impulsora)
  - Aumentando la temperatura
  - Aumentando la turbulencia
    - Aumentando la velocidad de alimentación
    - Efectos pulsantes
    - Espaciadores

# Concentración por polarización



# **APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANA AL CICLO INTEGRAL DEL AGUA**

# Índice de la presentación

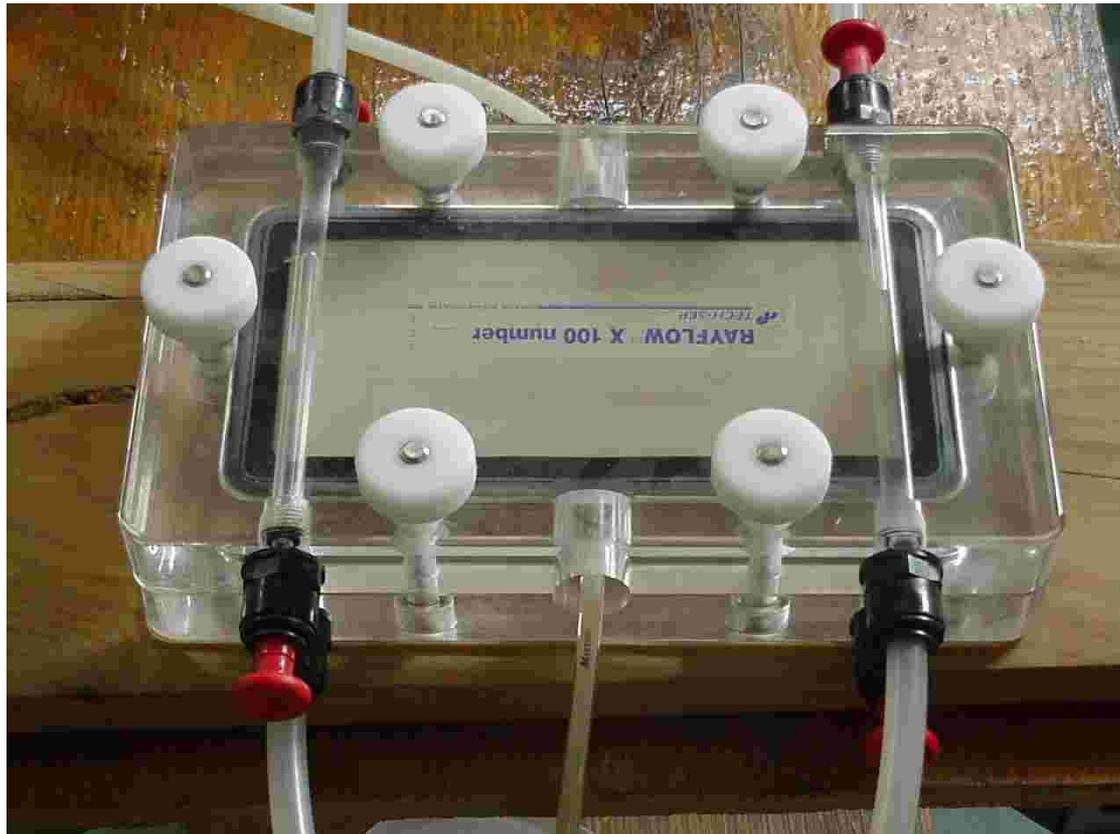
- Nuevas aplicaciones. ¿Cómo estudiarlas?
- Aplicaciones a aguas residuales industriales
- Biorreactores de membrana
- Regeneración de aguas residuales urbanas
- Aplicaciones a la potabilización de aguas

# 1. PROTOCOLOS PARA EL ESTUDIO DE APLICACIONES

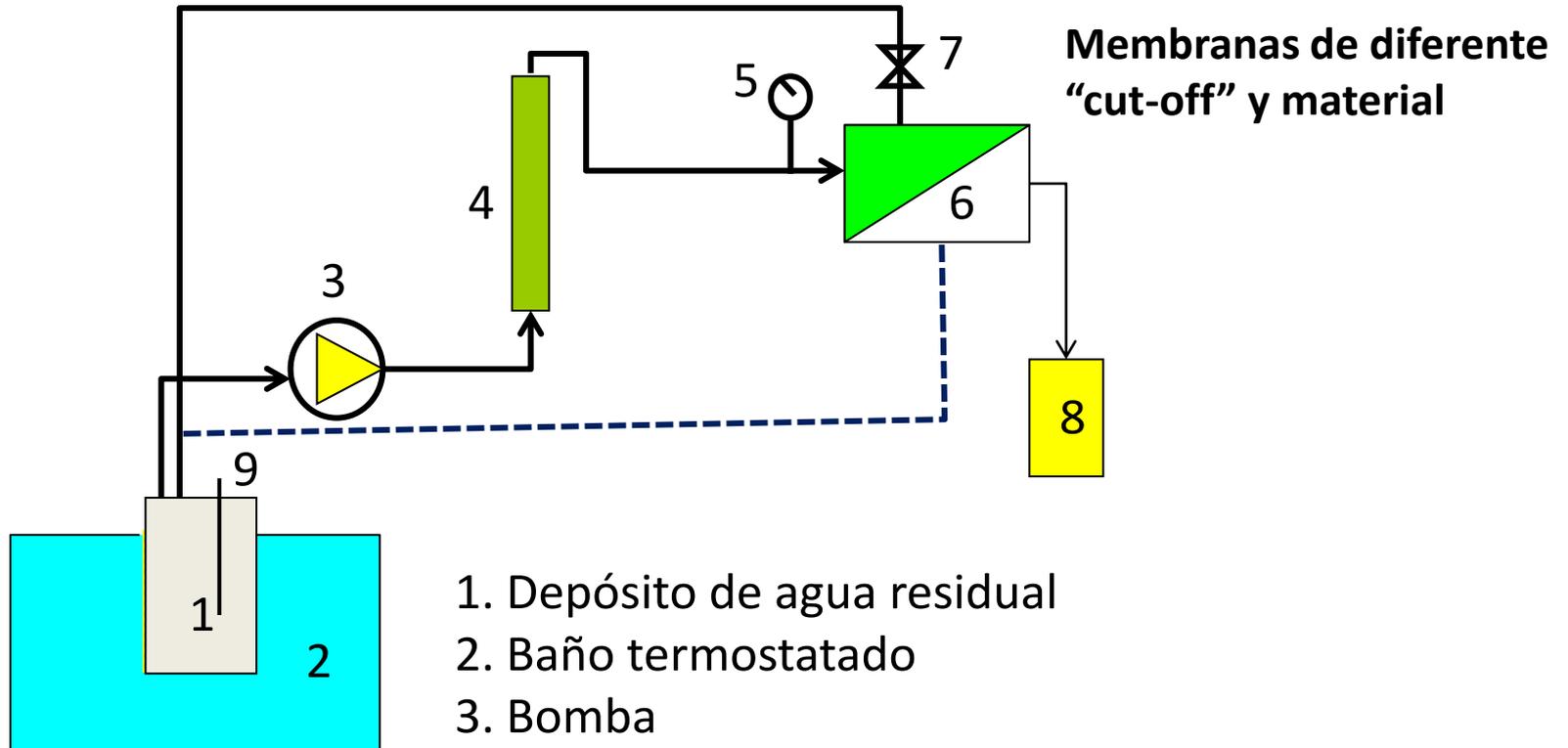
<b>Escala</b>	<b>Hitos</b>
Laboratorio	<ul style="list-style-type: none"><li>• Análisis completo del agua residual a tratar</li><li>• Selección de la membrana</li><li>• Selección aproximada de los parámetros de operación más importantes: velocidad tangencial y presión transmembranal</li><li>• Primeros ensayos de limpieza</li></ul>
Planta piloto	<ul style="list-style-type: none"><li>• Selección y prueba de los módulos</li><li>• Optimización del proceso</li><li>• Intervalos de limpieza y demanda de productos químicos</li><li>• Demanda de energía</li><li>• Calidad del permeado en la operación en continuo</li></ul>
Diseño de la instalación	<ul style="list-style-type: none"><li>• Análisis de resultados</li><li>• Diseño propiamente dicho.</li><li>• Estudio de viabilidad económica</li></ul>
Instalación industrial	<ul style="list-style-type: none"><li>• Control y optimización de los parámetros de operación y del consumo de energía</li></ul>

# 1. PROTOCOLOS PARA EL ESTUDIO DE APLICACIONES

## Selección de la membrana



# ESQUEMA DE LAS PLANTAS DE LABORATORIO

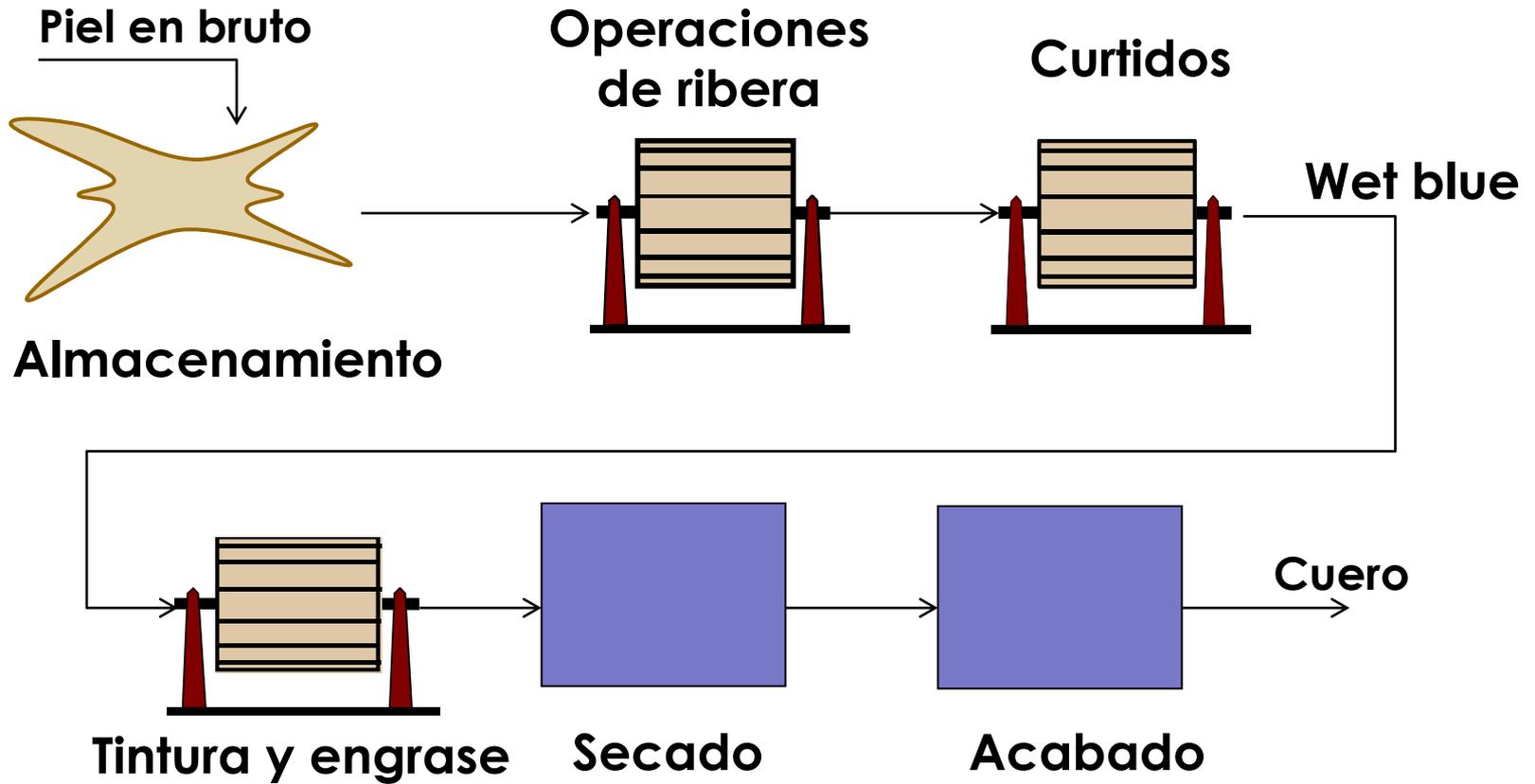


1. Depósito de agua residual
2. Baño termostatado
3. Bomba
4. Medidor de caudal
5. Manómetro
6. Módulo
7. Válvula
8. Depósito de permeado
9. Termómetro

# Estudio en planta piloto



# PROCESOS DE TENERÍA



# CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

**Caracterización del agua residual de una tenería con operaciones de ribera y curtido al cromo a partir de piel bovina**

---

Parámetro	
DQO , mg/L	5000 - 5500
DBO <sub>5</sub> , mg/L	3000 - 3500
Sólidos en suspensión (SS), mg/L	2500 - 3000
Cr <sup>3+</sup> , mg/L	80 - 100
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/L	1800 - 2000
Cl <sup>-</sup> , mg/L	5000 - 6000
pH	8 - 9
Conductividad mS/cm	10 - 12

---

# CONTRIBUCIÓN DE LOS PROCESOS AL AGUA RESIDUAL

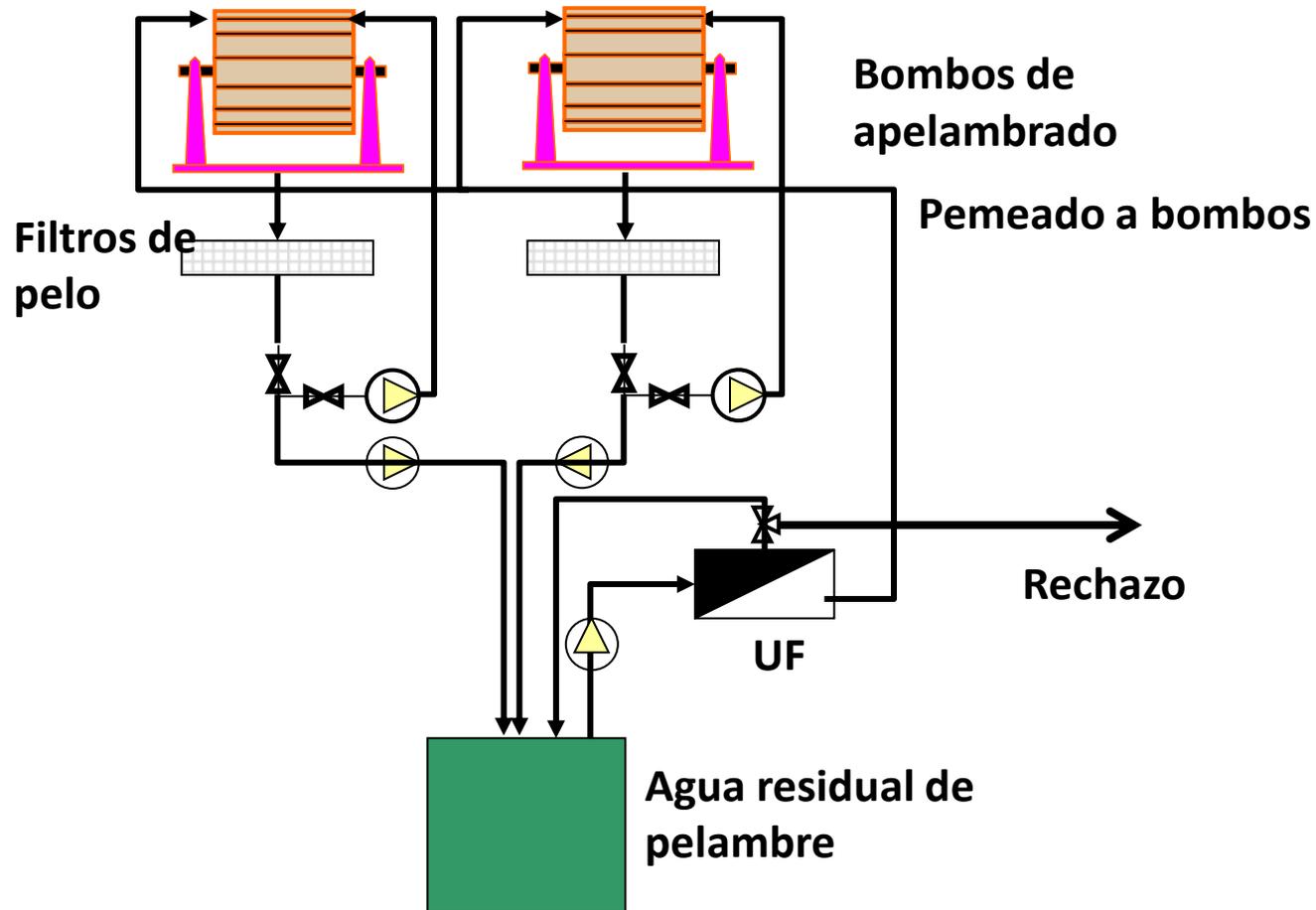
## PROCESOS DE TENERÍA

	Remojo	Apelambra- do	Desen- calado	Píquel/ Curtición	Otros
<b>DBO</b>	<b>10</b>	<b>70</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>15</b>
<b>DQO</b>	<b>15</b>	<b>55</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>25</b>
<b>SS</b>	<b>5</b>	<b>55</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>40</b>
<b>SALINIDAD</b>	<b>60</b>	<b>--</b>	<b>8</b>	<b>25</b>	<b>7</b>
<b>TOXICIDAD</b>	<b>--</b>	<b>76</b>	<b>--</b>	<b>24</b>	<b>--</b>

# BOMBO DE PROCESO



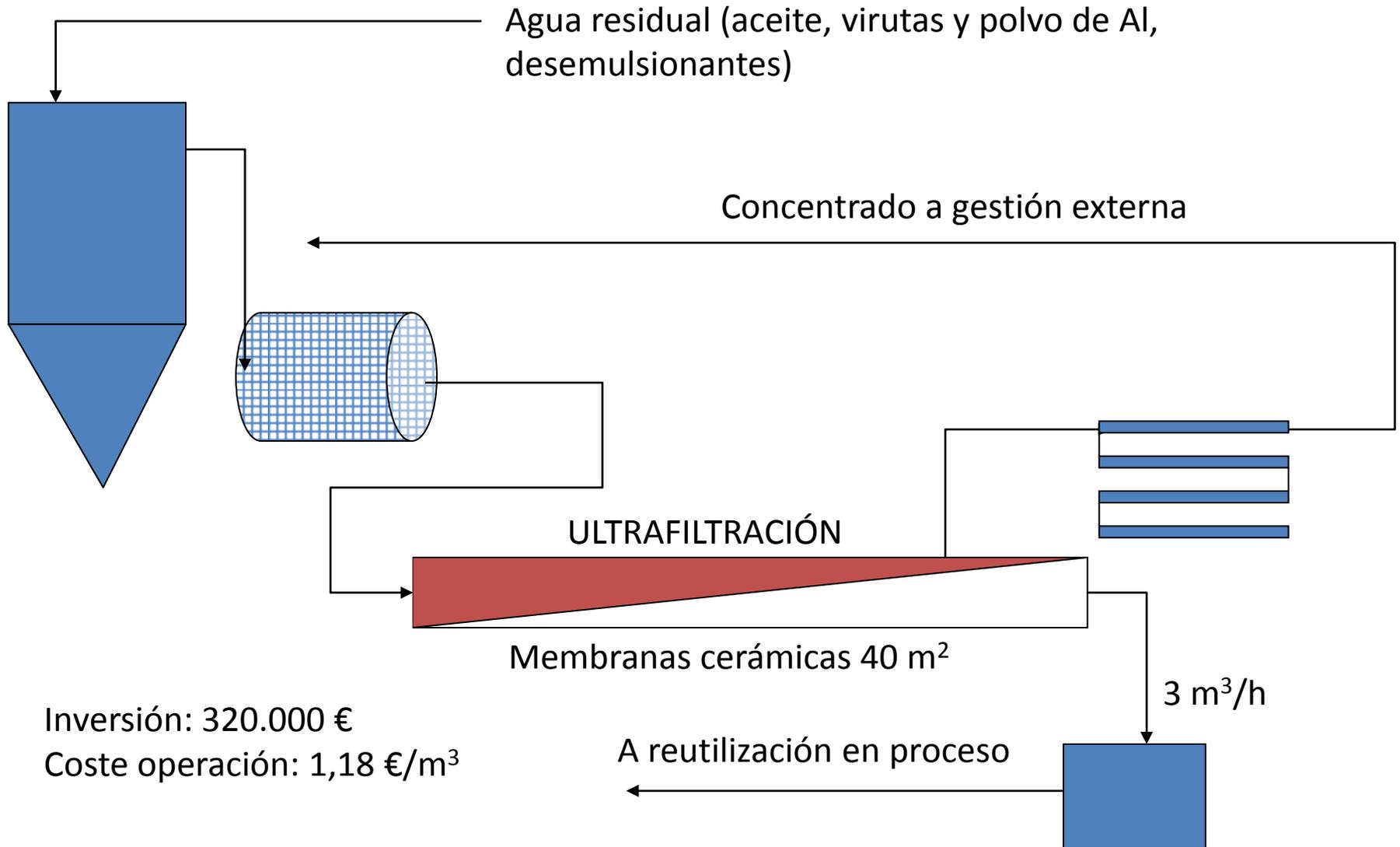
# REUTILIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL DE APELAMBRADO MEDIANTE UF



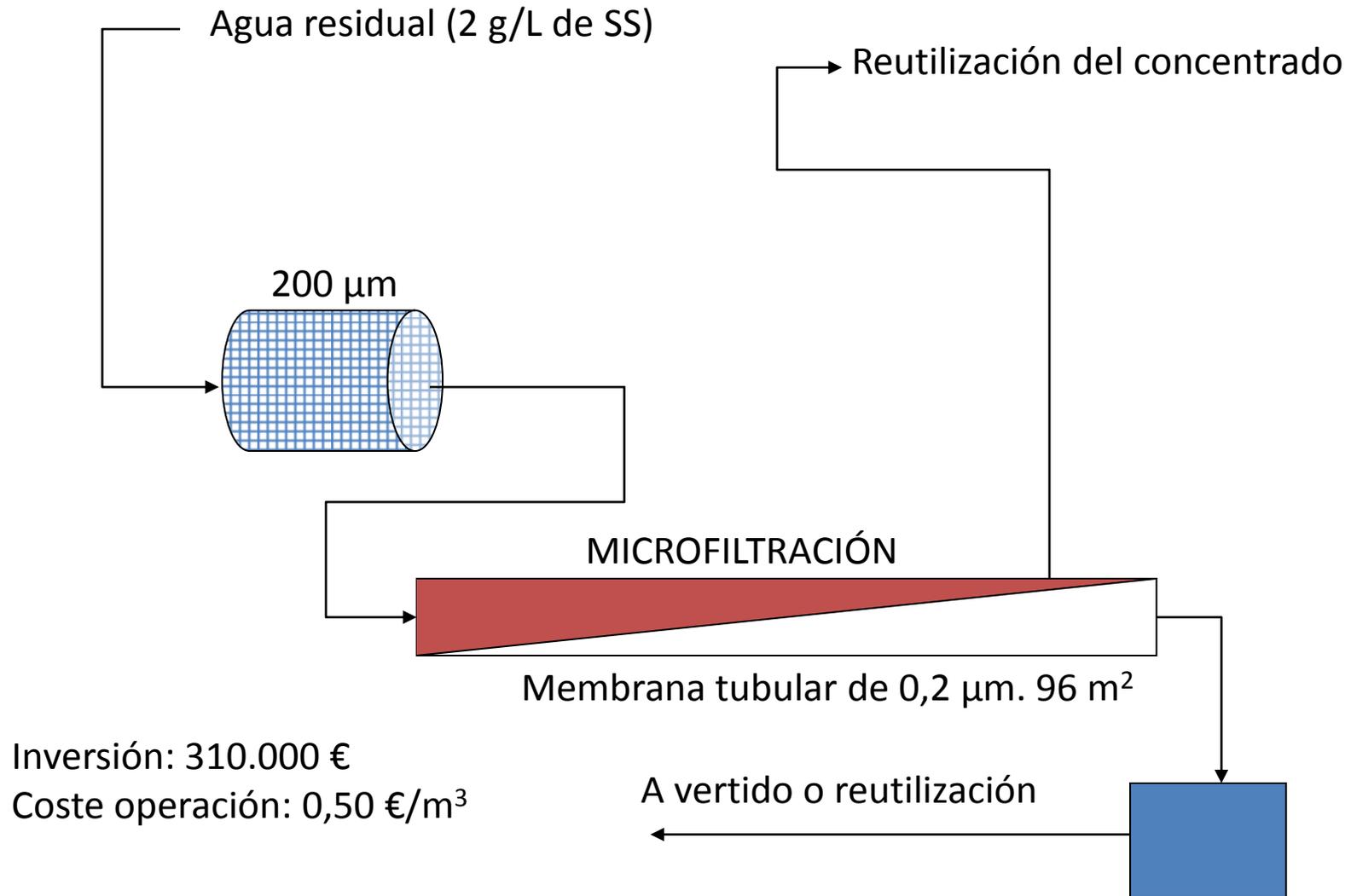
## 2. APLICACIONES A AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

- Industria del automóvil (recuperación de pinturas electroforéticas).
- Tratamiento de emulsiones agua-aceite.
- Industria láctea.
- Industria textil.
- Industria de la pulpa y del papel.
- Lixiviados
- Industria de curtidos
- Biorreactores de membrana

# TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO



# TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓXIDO DE MAGNESIO



### **3. BIORREACTOR DE MEMBRANA (MBR)**

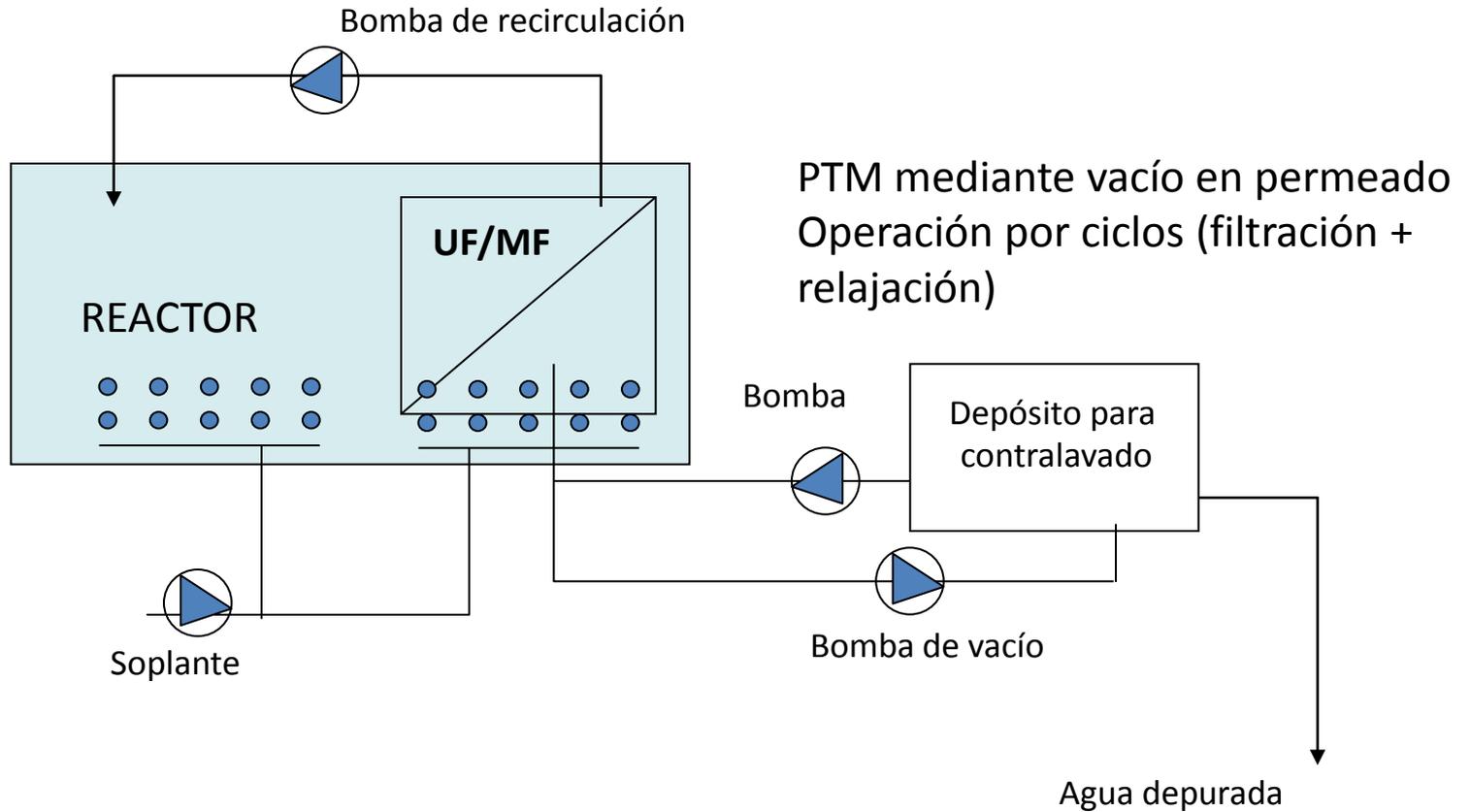
- Variante del proceso de fangos activos en el que la biomasa se separa mediante ultrafiltración o microfiltración.
- Evita problemas de decantación y flotación consiguiendo además mayor calidad en agua depurada.
- Permite mantener más biomasa en el reactor, por lo que supone ahorro de espacio
- Muy buena calidad de agua tratada

# Configuraciones

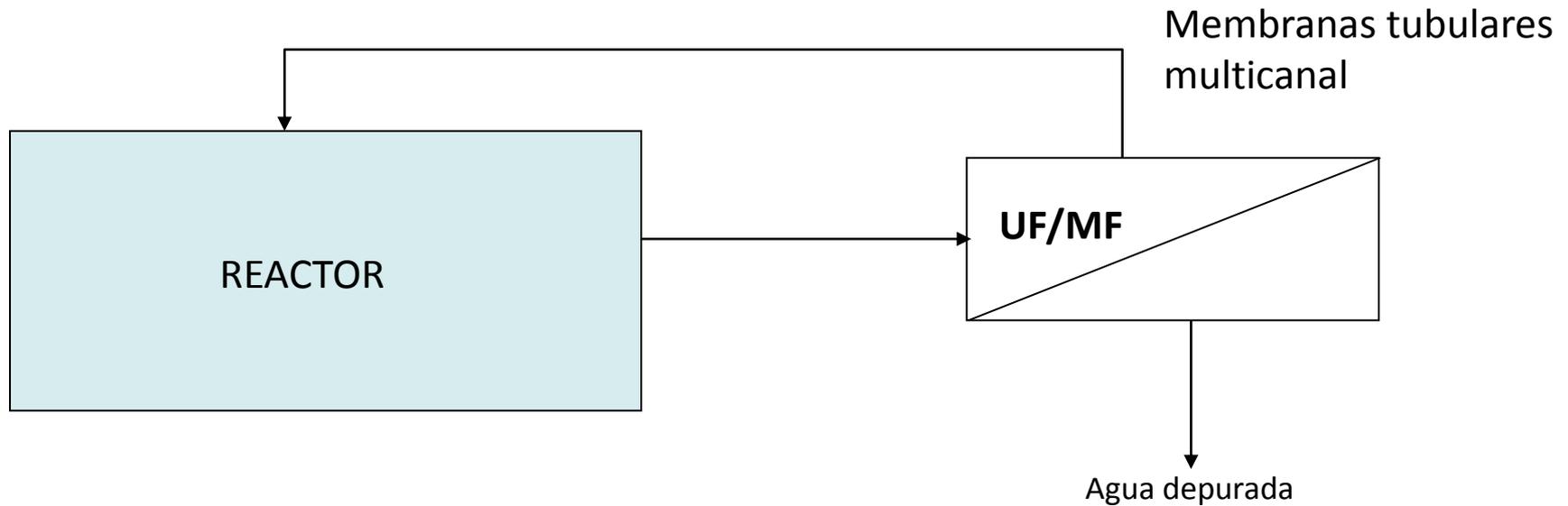
- Membranas sumergidas
- Membranas externas

# Membranas sumergidas

FIBRAS HUECAS  
PLANAS

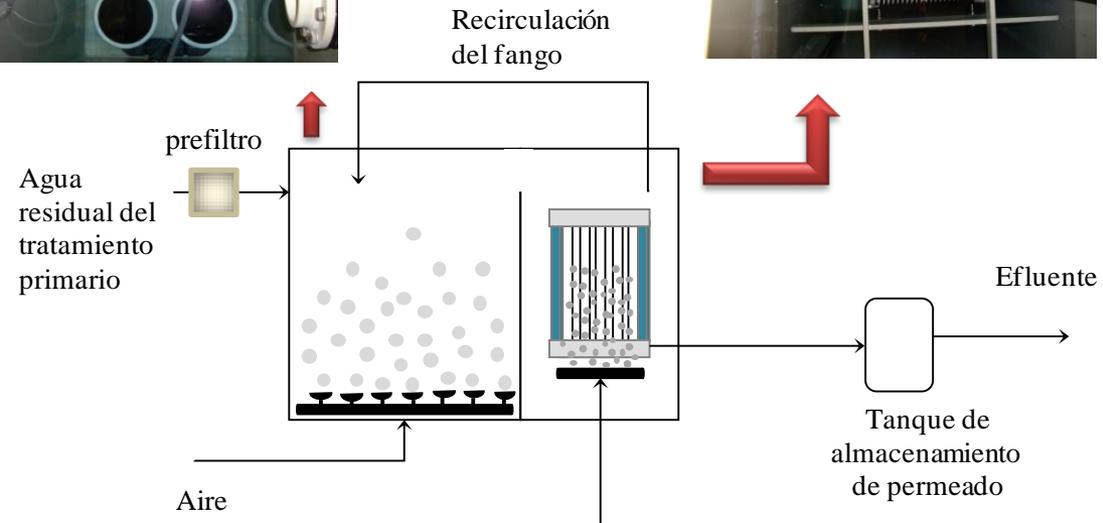


# Membranas externas al reactor no sumergidas



# MEMBRANAS MICRODYN NADIR Y PLANTA PILOTO ECOTEC

## DESCRIPCION GENERAL



Capacidad reactor	1.05 m <sup>3</sup>
Módulo BC10-10	1230x350x256 mm
Tamaño poro	0.04 µm (150 kDa)
Superficie de las membranas	10 m <sup>2</sup>
Material membrana	PES

# PLANTA PILOTO



# PLANTA PILOTO



# ¿QUÉ SE ESTÁ INVESTIGANDO?

- DISMINUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO (optimización de aireación)
- OPERACIÓN QUE MINIMIZA SUSTANCIAS POLIMÉRICAS EXTRACELULARES
- QUORUM QUENCHING
- BIORREACTORES CON MEMBRANAS DE NANOFILTRACIÓN
- BIORREACTORES OSMÓTICOS

## 4. REGENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

- Se trata de un tratamiento terciario que sustituye a coag + floc + sedimentación + filtración + radiación UV
- Se emplean membranas de fibras huecas (ejemplo membranas *Pentair X-FLOW*)
- Menor coste de operación en modo “dead end”.
- Responsable del ensuciamiento (materia orgánica del efluente)

## 5. APLICACIONES A POTABILIZACIÓN DE AGUAS

- PROCESOS DE DESALACIÓN (electrodiálisis, ósmosis inversa)

Ejemplo OI: desaladora de Jávea (26000 m<sup>3</sup>/d)

- PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES

# MF/UF en potabilización

- Podrían sustituir a decantación + filtración.
- Reducen la cantidad de desinfectante final.
- Pueden ir precedidas de coagulación.
- Membranas de fibras huecas, capilares y arrollamiento en espiral.
- Membranas orgánicas de PS, PES o PVDF.

# Ventajas de MF/UF en potabilización

- Mayor calidad del agua tratada.
- Sistema mucho más compacto.
- Mejor control de la operación y mantenimiento.
- Ahorro de productos químicos.
- Menor producción de fangos.



# MICROFILTRACIÓN. Membranas CMF y CMF-S de MEMCOR

- Material: PP o PVDF.
- Control de calidad mediante PDT.
- Limpieza periódica de las membranas.



# TESTS DE INTEGRIDAD

- Necesario para comprobar que las membranas no se han roto y permiten el paso de microorganismos.
- Han de detectar “agujeros” de 3 micras.
- Se puede realizar diariamente.
- Un ejemplo es el “pressure decay test”.