



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Instituto Universitario del Agua
y de las Ciencias Ambientales

Aspectos fundamentales relacionados con la desalinización y las membranas utilizadas

Daniel Prats Rico

Catedrático de Ingeniería Química

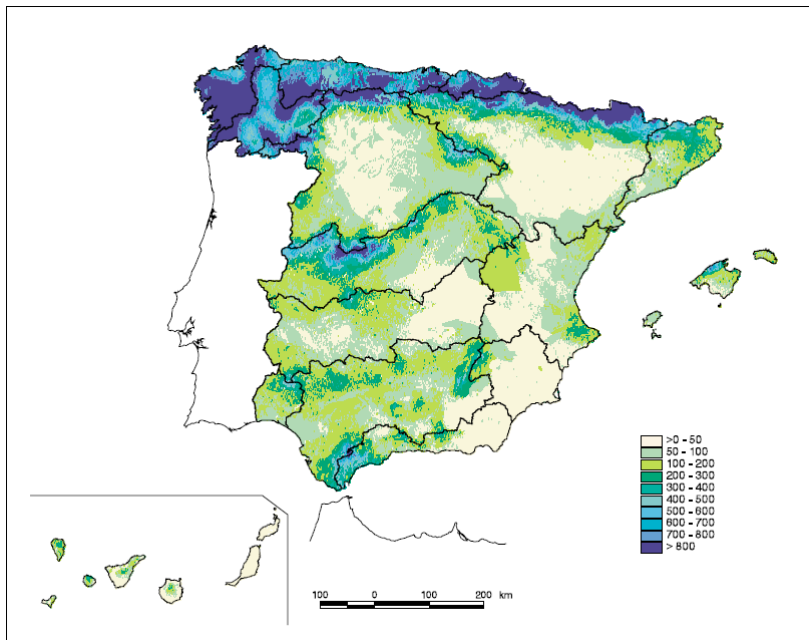
Coordinador de Proyectos y Desarrollo del

Instituto del Agua y de las Ciencias Ambientales

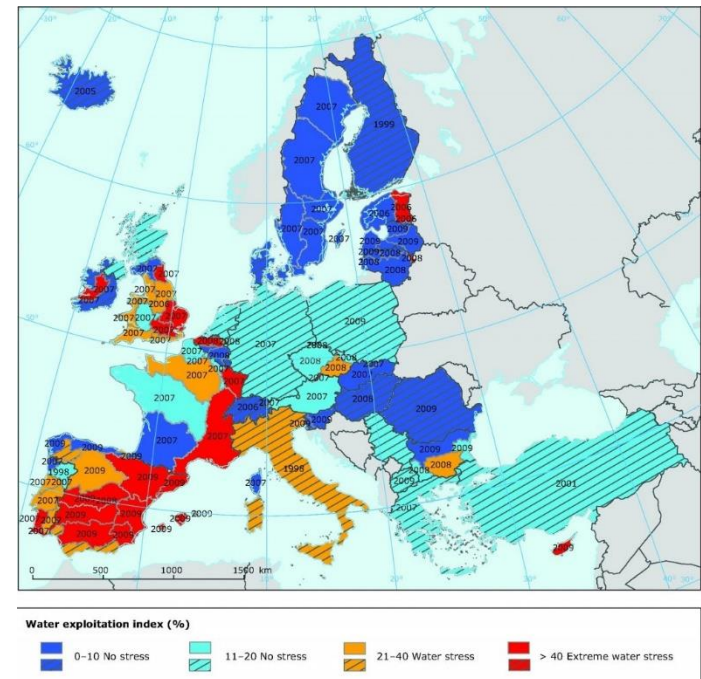
Como todos sabemos, las precipitaciones derivadas del ciclo del agua están desigualmente repartidas espacialmente y temporalmente. Ejemplo España con grandes desequilibrios

Pluviometría, mm/año

Estación	Valor medio 1997-2006	Màximo	Mínimo
Santiago	1862	2319	1352
San Sebastián	1440	1734	1051
Alicante	271	569	169
Murcia	251	387	170
Almería	182	250	65



Estrés hídrico en Europa



¿Qué podemos hacer cuando no hay agua suficiente?

Por una parte **OPTIMIZAR** el agua disponible (evitar pérdidas, optimizar la gestión de uso público y el uso privado, técnicas de riego localizado, etc.)

Por otra parte intentar **INCREMENTAR** los recursos



Trasvase desde cuencas excedentarias



Reutilización de aguas residuales



Desalación de aguas salobres y agua del mar

CONCEPTO DE DESALACIÓN

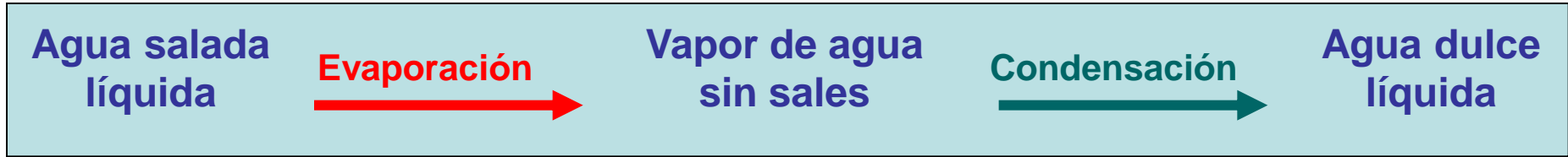
Según la 23ª Ed. (2014) del diccionario de la Real Academia Española, desalinización es “La acción y efecto de desalinizar” y desalinizar (desalar) es “Quitar la sal del agua del mar o de las aguas salobres, para hacerlas potables o útiles para otros fines.”



PROCEDIMIENTOS PARA LA DESALACIÓN

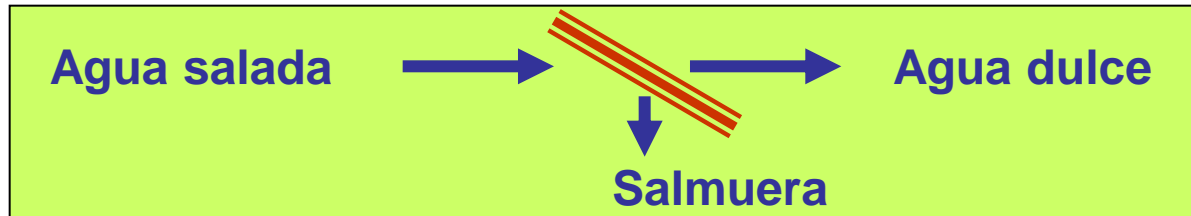
Existen 2 grupos de procedimientos de interés industrial:

1. Procedimientos basados en la evaporación y condensación del agua (ciclo del agua en la naturaleza):

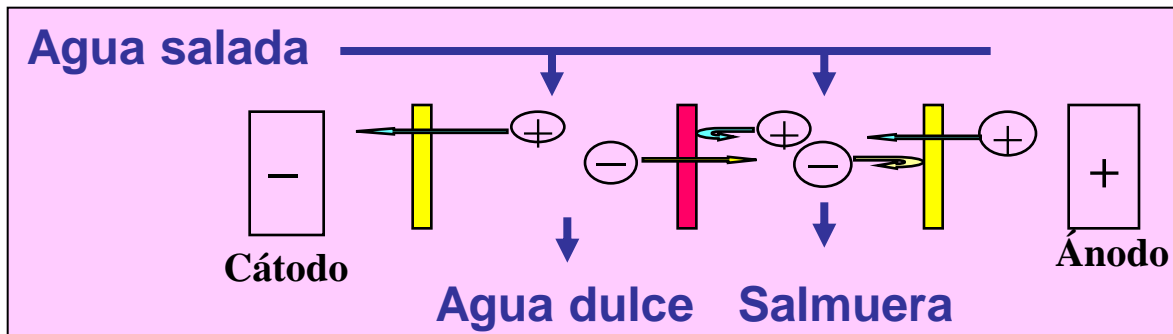


2. Procedimientos basados en membranas:

a) Ósmosis inversa. Membranas semipermeables que retienen sales disueltas.



b) Electrodiálisis. Membranas selectivas que permiten el paso de ciertos iones



DESALACIÓN MEDIANTE EVAPORACIÓN



Agua de mar

Circuito de refrigeración para condensar el agua

Cámara de condensación

Vapor

Agua

Cámara de evaporación

Agua dulce

Circuito de calefacción para hervir el agua

Salmuera

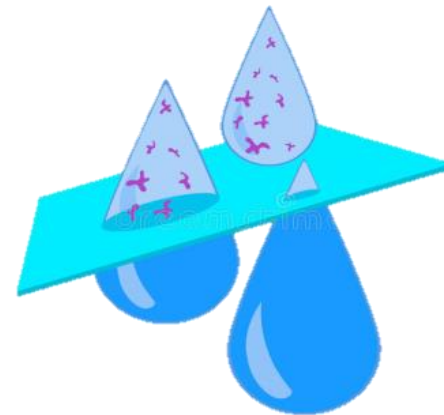
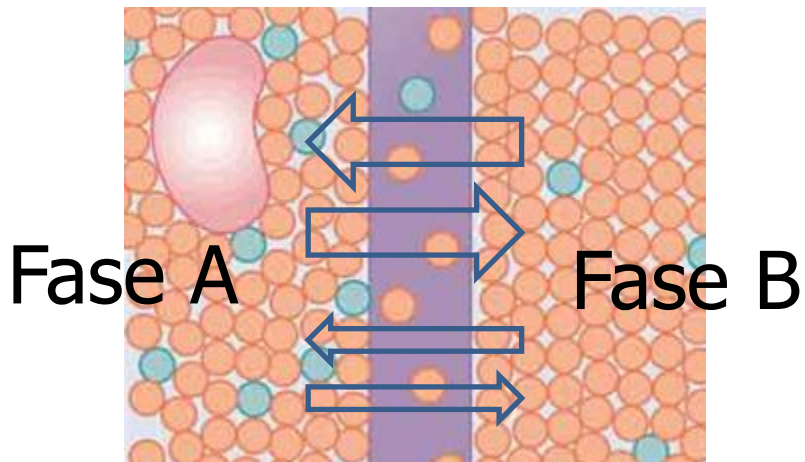
Se precisa energía térmica para calentar y evaporar el agua. Se usan distintos procedimientos para recuperar la energía.

En todos ellos el consumo final es superior a la desalación mediante membranas.

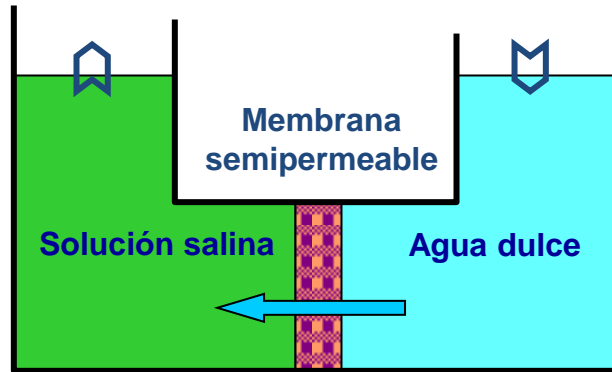
En todos los países con dependencia energética exterior no se emplean técnicas de evaporación salvo aplicaciones muy específicas.

USO DE MEMBRANAS SEMIPERMEABLES

Las membranas semipermeables son barreras físicas que se disponen entre dos fases separándolas e impidiendo su contacto directo, pero que permiten el movimiento del disolvente y de sustancias disueltas a través de ellas por el mecanismo de difusión, lo que se realiza de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua

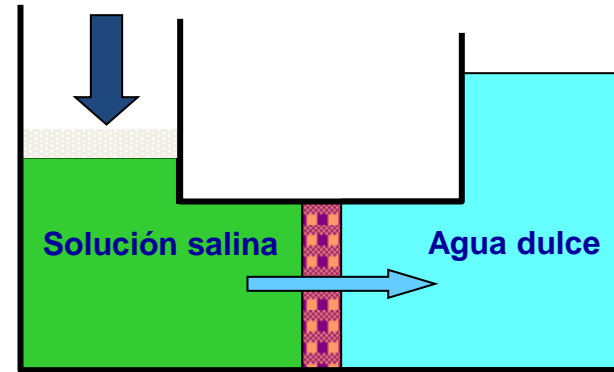


ÓSMOSIS INVERSA. PRESIÓN OSMÓTICA

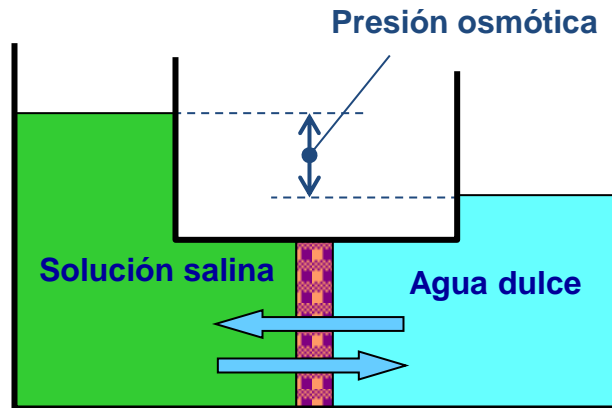


ÓSMOSIS NATURAL

Presión superior
a la osmótica



ÓSMOSIS INVERSA

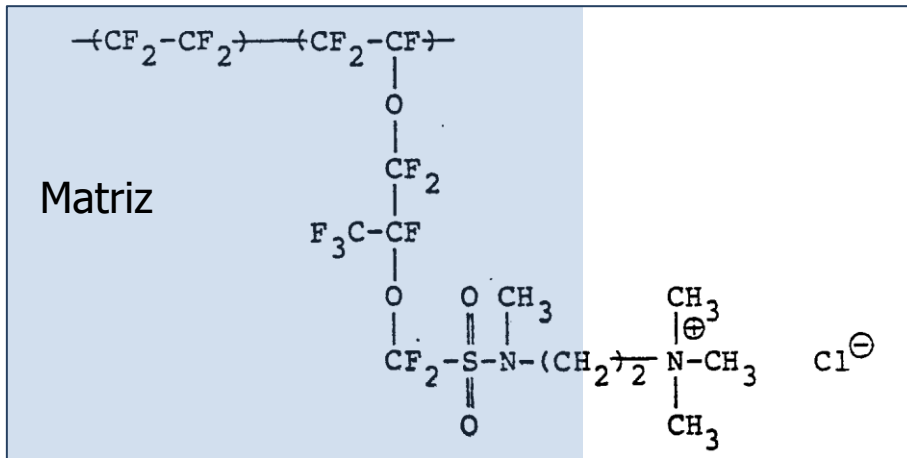


EQUILIBRIO

La presión osmótica es la presión que ejercen las partículas del disolvente en una disolución sobre la membrana semipermeable que la separa de otra de mayor concentración. Esta presión es directamente proporcional a la concentración de sales disueltas. Para agua de mar es de 25 a 30 bar. La presión de trabajo en este caso es 60 a 70 bar.

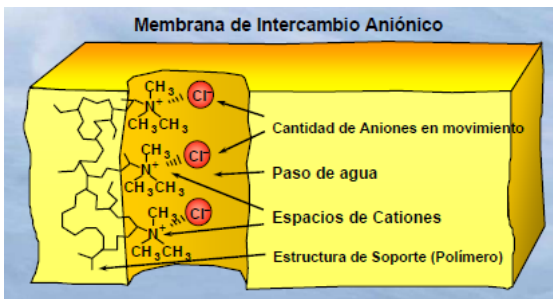
USO DE MEMBRANAS DE INTERCAMBIÓ IÓNICO

Membrana aniónica de amonio cuaternario



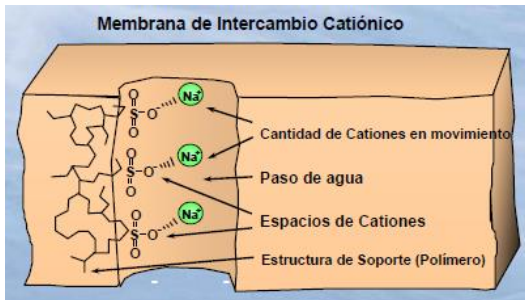
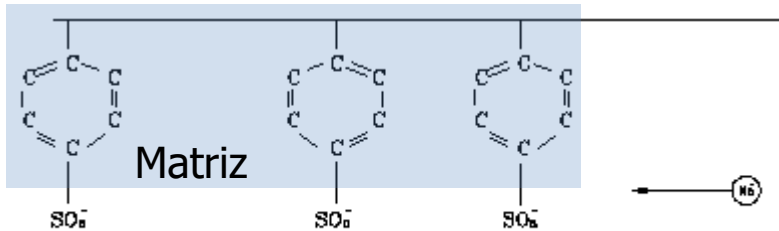
Las membranas aniónicas, presentan dos problemas:

- El enlace del amonio cuaternario con la matriz es débil, por lo que se rompe con facilidad, y se pierde paulatinamente la capacidad de transferencia
- Al estar cargada positivamente, atrae a los coloides presentes en el agua, (que poseen carga negativa), ensuciándose con facilidad



USO DE MEMBRANAS DE INTERCAMBIÓ IÓNICO

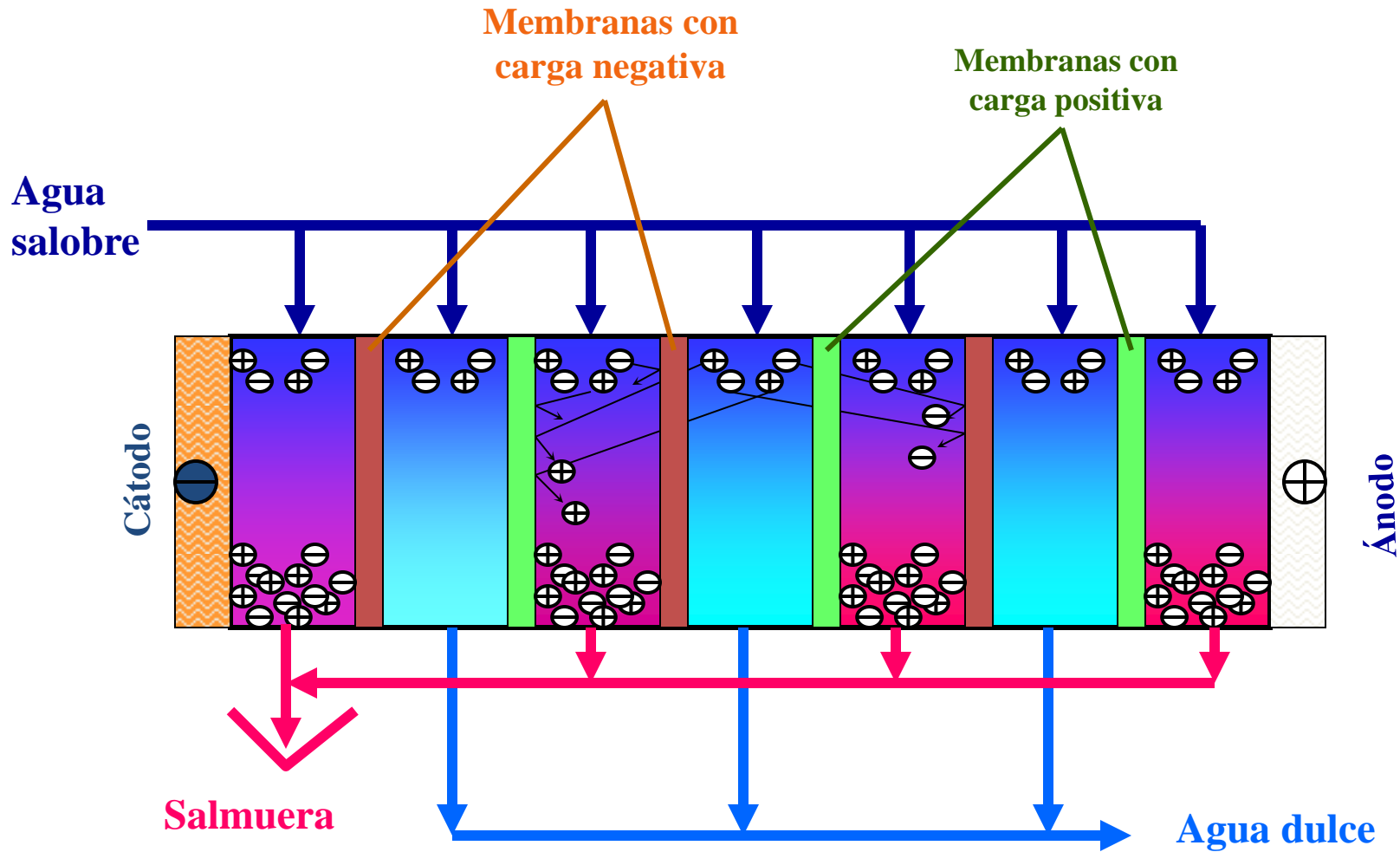
Membrana catiónica de tipo sulfonato



Al contrario de lo que les ocurre a las aniónicas, las membranas catiónicas poseen todas las ventajas:

- El enlace del ión sulfonato con la matriz es muy fuerte y por tanto la membrana no pierde características a lo largo de su vida, no necesitando reemplazarse.
- Al poseer cargas negativas, repele a los coloides y por tanto no se ensucia

ELECTRODIÁLISIS



Resumen de aplicación de las distintas tecnologías de desalación



Evaporación:

- Alto consumo energético
- Desalación de agua de mar y salmueras
- Aplicación en países con suficiencia energética



Ósmosis inversa:

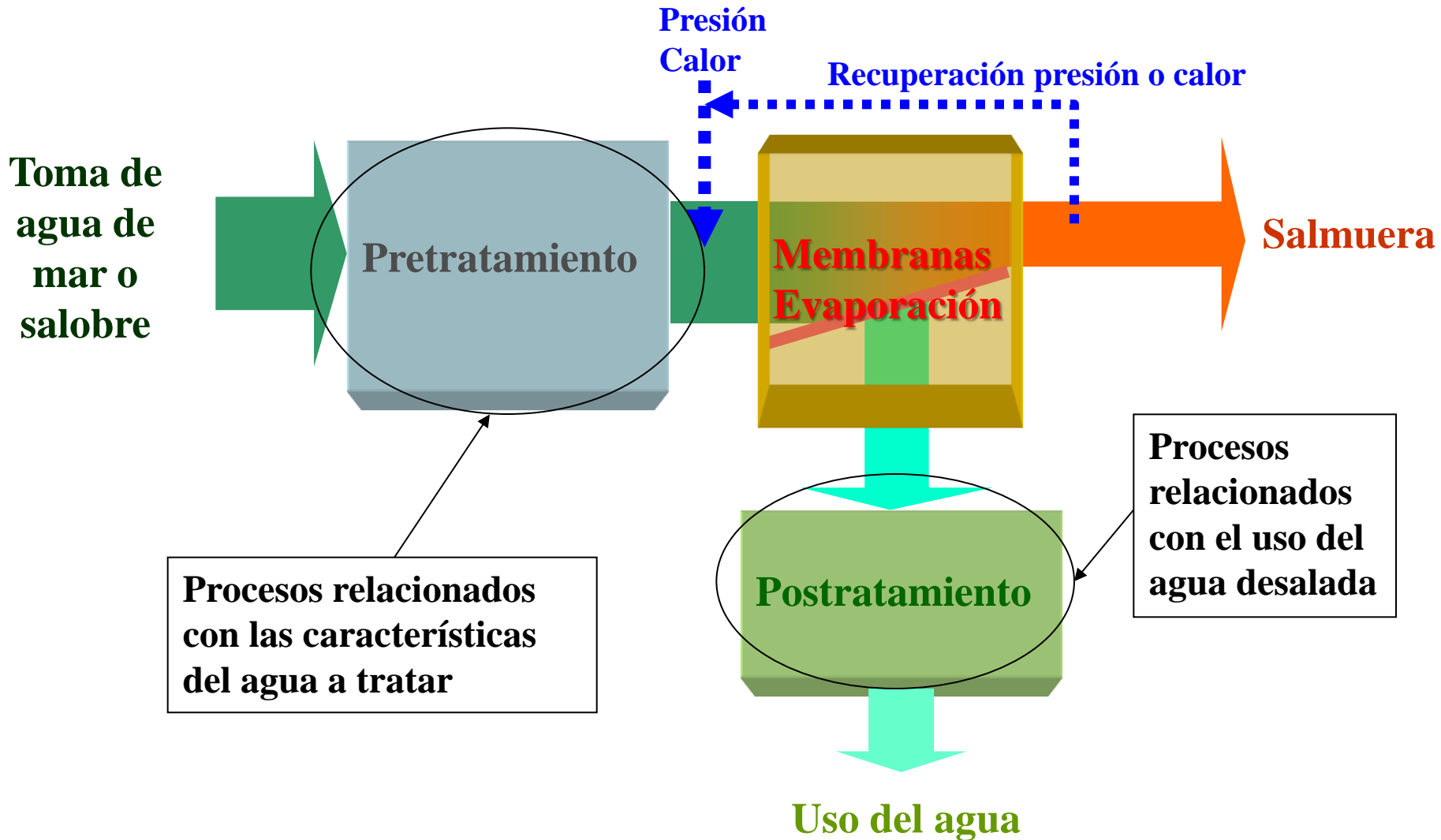
- Bajo consumo energético
- Desalación de aguas salobres naturales, aguas residuales tratadas, agua de mar y salmueras



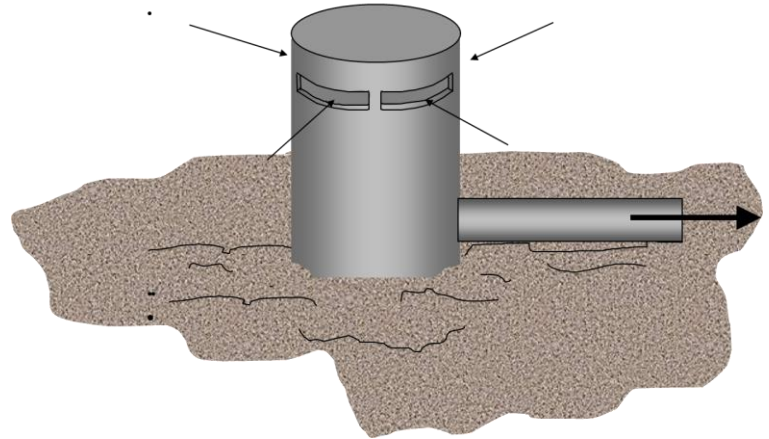
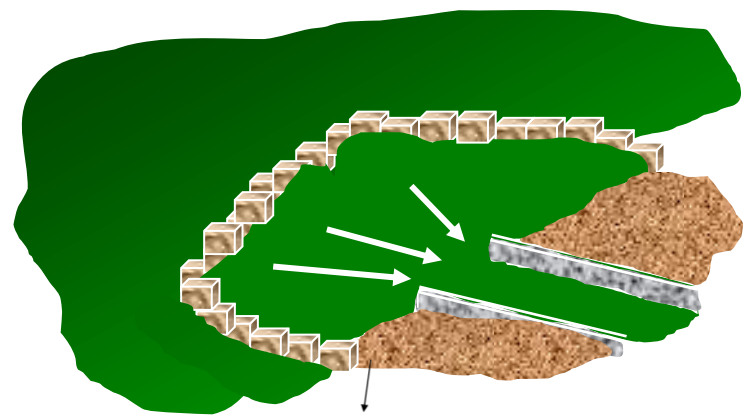
Electrodíálisis:

- Bajo consumo energético para baja salinidad
- Desalación de aguas salobres naturales, aguas residuales tratadas

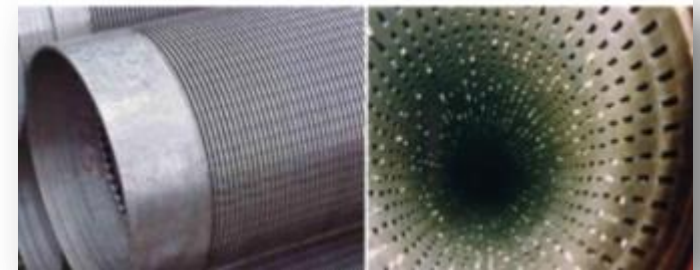
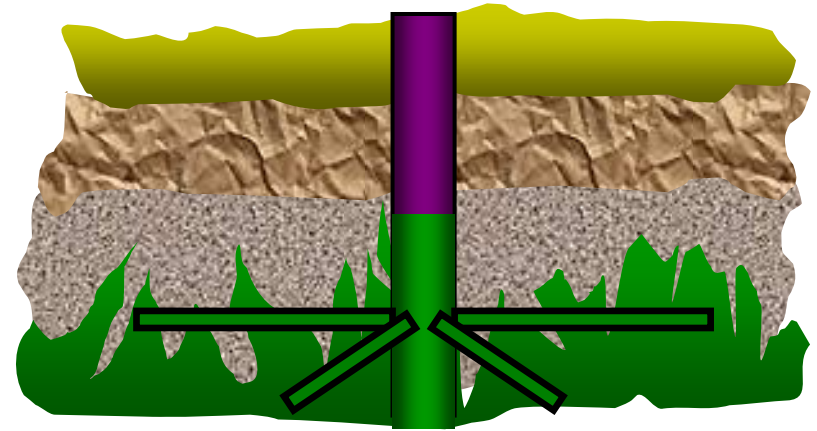
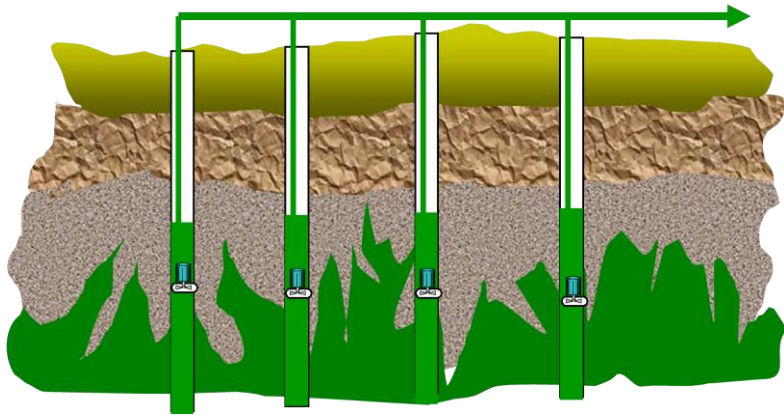
DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA



CAPTACIÓN de agua de mar directa



CAPTACIÓN de agua de mar a través de pozos playeros o drenes



PRETRATAMIENTO

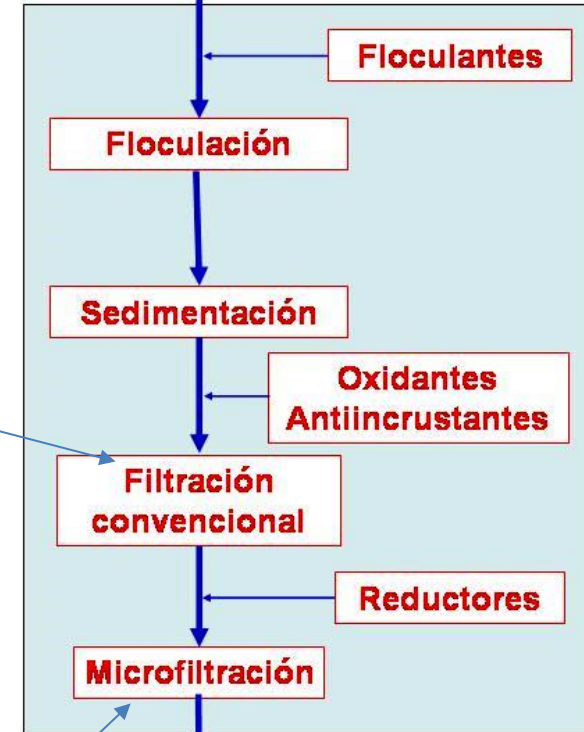
El pretratamiento está directamente relacionado con la calidad del agua a desalinizar.

Hay que procurar que a la etapa de ósmosis inversa llegue únicamente el agua con las sales disueltas. Se debe eliminar todo los otros componentes del agua.

Las aguas subterráneas terrestres o las del mar captadas a través de pozos o drenes precisan mucho menos pretratamiento que las aguas superficiales, residuales, o las del mar captadas en toma directa.

Esquema general pretratamiento

Agua bruta



Agua a proceso de ósmosis inversa

Pretratamiento químico

TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO – Coagulantes/Floculantes

DESINFECCIÓN – NaClO – cloro - ozono - otros biocidas – radiación UV

CORRECCIÓN DE pH – ácidos, CO₂, etc.

AGENTES REDUCTORES

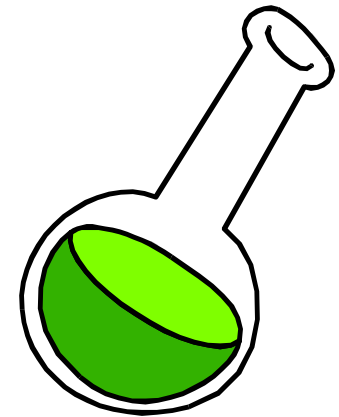
ANTIINCRUSTANTES

REACTIVOS DE LIMPIEZA QUÍMICA

Ácidos y álcalis

Detergentes y detergentes enzimáticos

Biocidas



Bombeo a alta presión: 10-20 bar para aguas salobres, 60-70 bar para agua de mar

Tipos de bomba más utilizados.

Centrífugas multicelulares (segmentadas)

Cámara partida

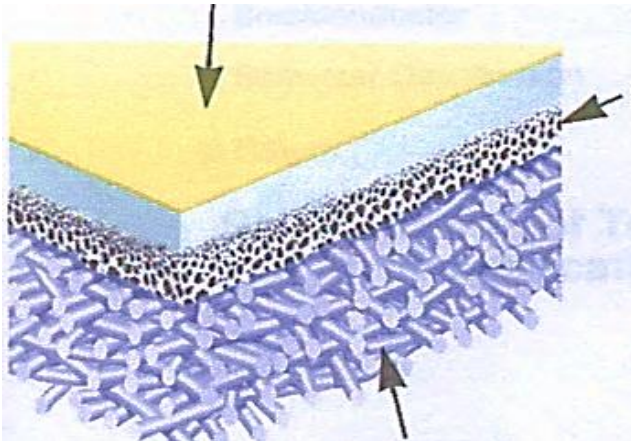
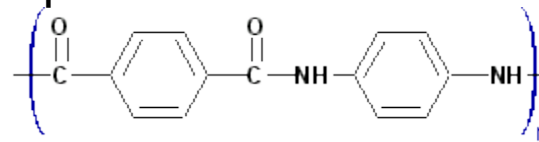
Otros (pistones, monoetapa)



Las membranas empleadas en ósmosis inversa son de tipo asimétrico y formadas con capas de distintos materiales. Ejemplo:

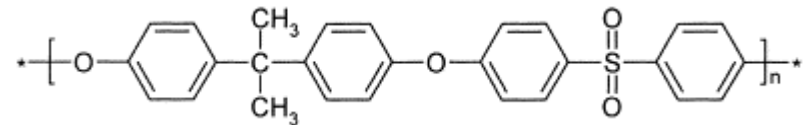
Membrana densa ultrafina (capa activa que separa los iones), 0,2 μm de espesor

Material: poliamida aromática



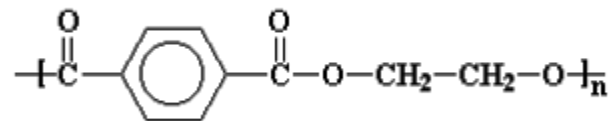
Membrana de soporte microporosa, 60 μm de espesor

Material: polisulfona



Substrato para resistencia mecánica, 100 μm de espesor

Material: poliéster



Parámetros de funcionamiento de las membranas

Permeabilidad

$$J = \frac{\text{Velocidad de transferencia}}{\text{Área de transferencia}} = \frac{B_o \Delta P}{\mu Z}$$
$$J = \frac{\Delta P}{\mu r}$$

J = densidad de flujo de permeado, L T⁻¹

B_o = permeabilidad al soluto, L² (esta permeabilidad de las membranas se puede relacionar con propiedades microestructurales de las mismas como la porosidad total, el radio medio de los canales internos y la tortuosidad de los mismos)

ΔP = presión transmembrana, M L⁻¹ T⁻²

μ = viscosidad dinámica, M L⁻¹ T⁻¹

Z = espesor de la capa activa de la membrana, L

Selectividad

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_b}\right) \times 100$$

C_p = concentración en el permeado, M L⁻³

C_b = concentración en la alimentación, M L⁻³

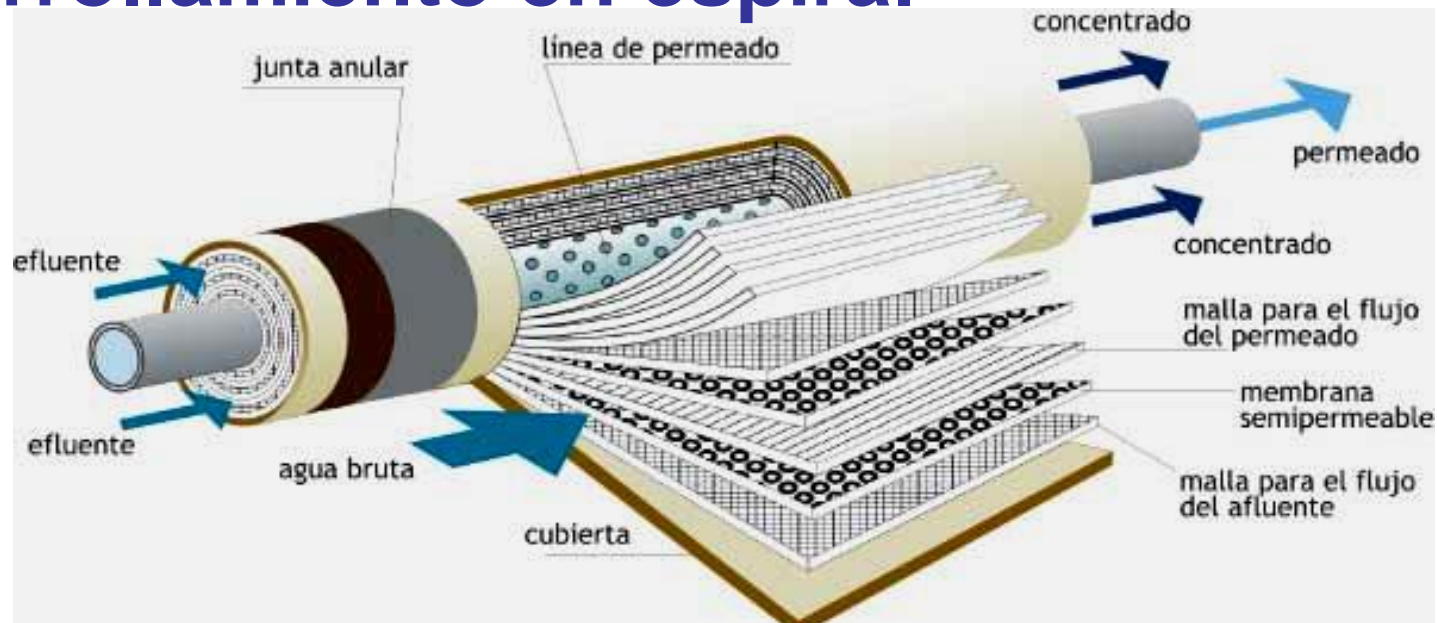
Módulo de membranas en ósmosis inversa

Para las operaciones con membranas es necesario un dispositivo en el que se puedan poner en contacto con la corriente alimento para obtener las corrientes de permeado y rechazo.

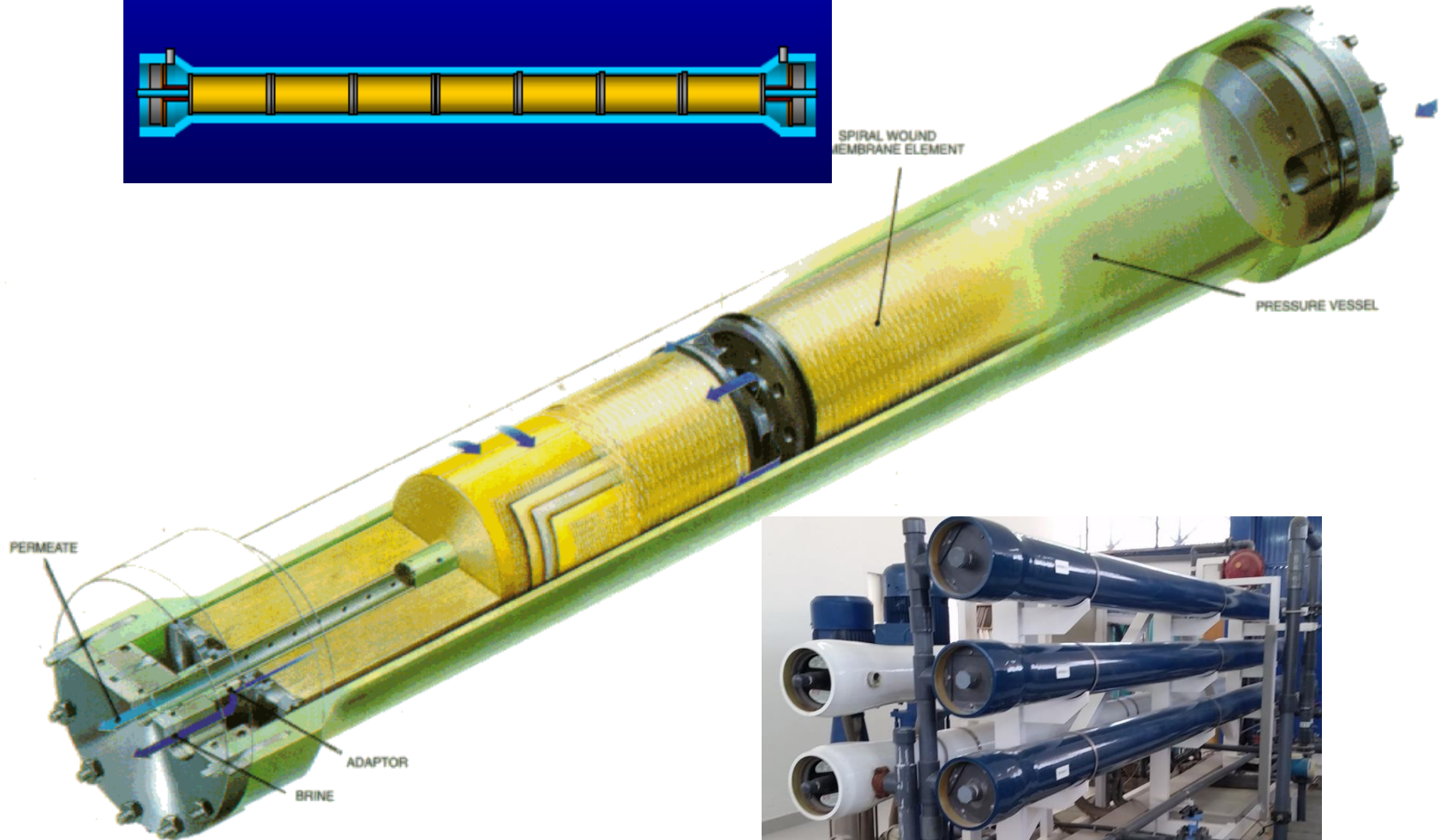
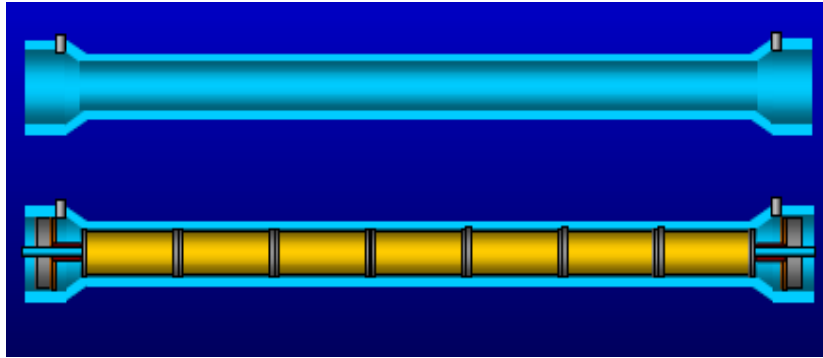
Este dispositivo se denomina módulo y debe cumplir una serie de características como soportar las presiones de trabajo, facilitar la limpieza o reposición de membranas, resistir agentes de limpieza química, etc.

El módulo incorpora membranas, estructuras de soporte de presión, puertos de entrada de la alimentación, distribuidores del caudal y puntos de salida y drenaje del permeado y concentrado.

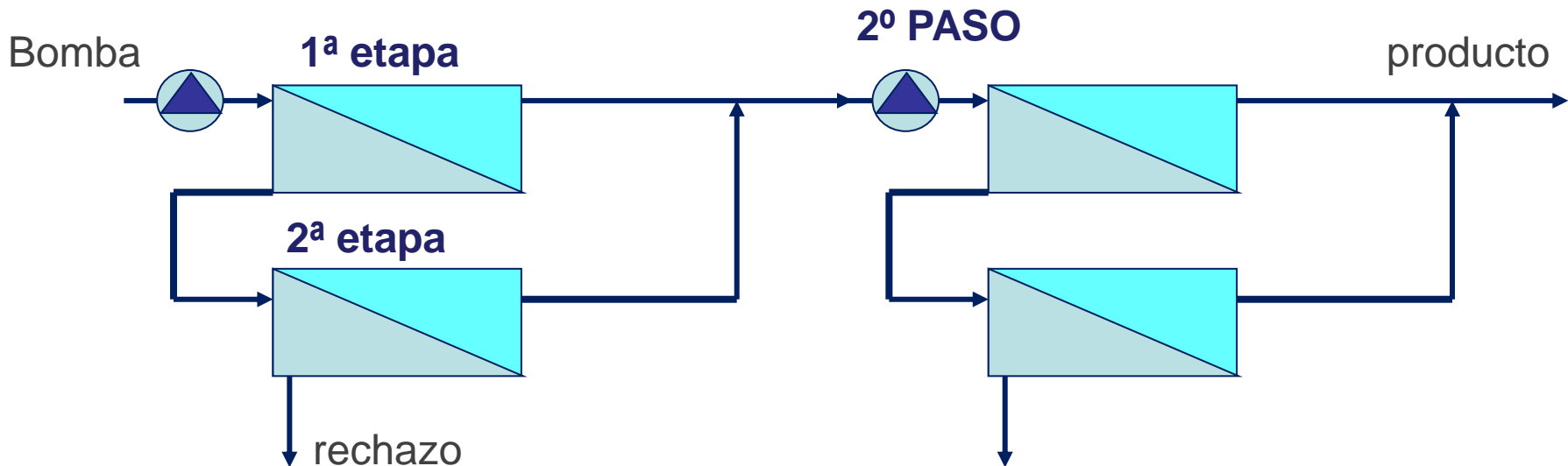
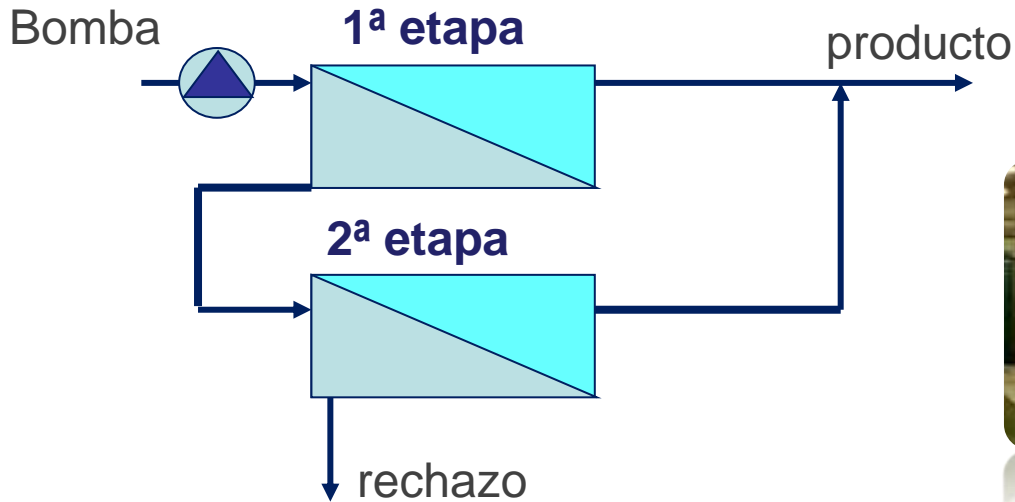
Arrollamiento en espiral



Tubos de presión



Concepto de ETAPA y PASO

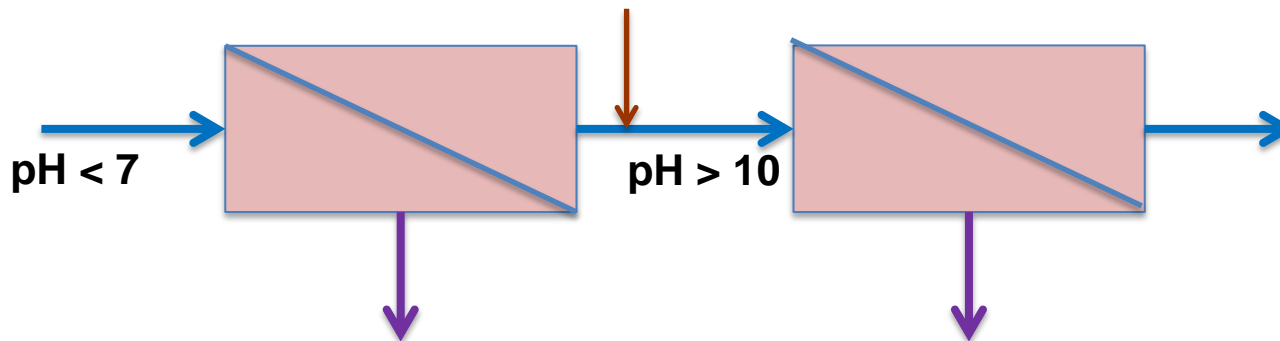


Hay varias combinaciones posibles, con o sin bomba intermedia, cada paso con 1 ó 2 etapas, recirculando o no el rechazo del 2º paso al aporte, etc.

Ejemplo de aplicación de 2 pasos: reducción de boro

El boro es un elemento que tiene mucho interés. Para aguas potables su concentración se limita a 1 mg/L, y para regadío hay cultivos muy sensibles que no toleran concentraciones superiores 0,5 mg/L.

El agua de mar contiene unos 3-4 mg/L de boro y hay aguas salobres con concentraciones superiores. El problema surge de que las membranas rechazan habitualmente un 60 a 70 % del boro a los pH de trabajo habituales (en que el boro se encuentra en forma de ácido bórico), por lo que puede ser necesario un segundo paso de ósmosis a pH básico (el boro pasa a encontrarse en forma de borato)

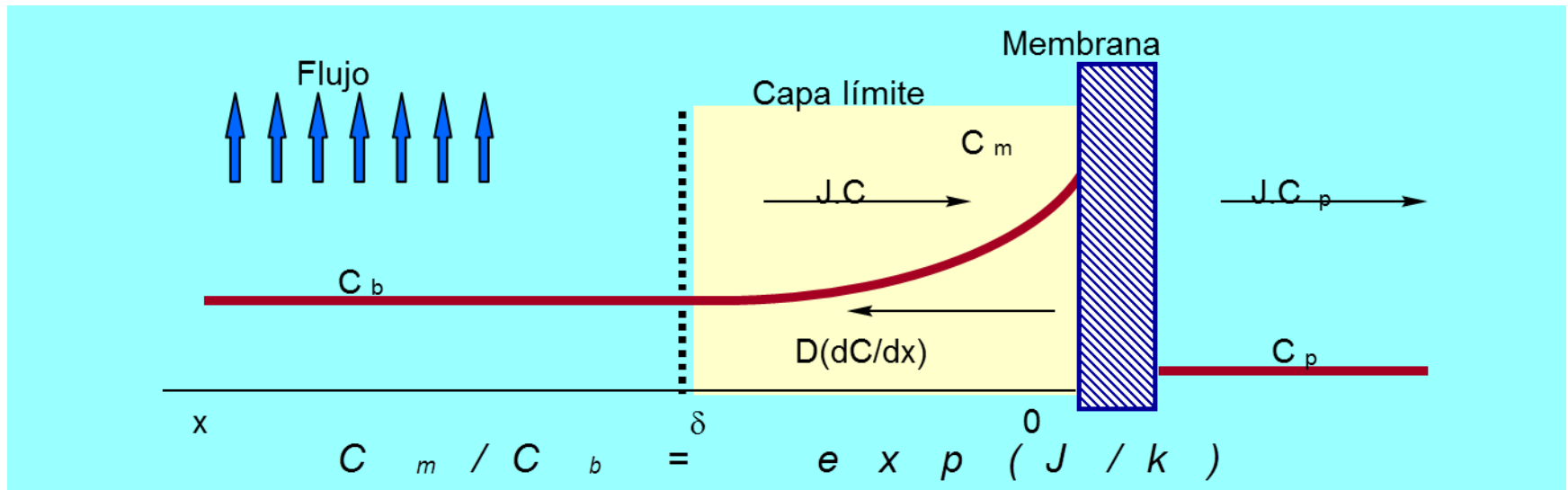


Aspectos operacionales

Polarización por Concentración: Aumento de la concentración de solutos en la superficie de la membrana

Provoca los siguientes problemas:

- Aumento de la presión osmótica en la zona adyacente a la membrana, y una consecuente disminución del gradiente impulsor del proceso.
- Disminución de la eficiencia de separación de la membrana debido al aumento de la concentración de solutos en la capa límite.
- Incrustaciones en la superficie de la membrana debido a la precipitación de sales que excedan el límite de solubilidad.

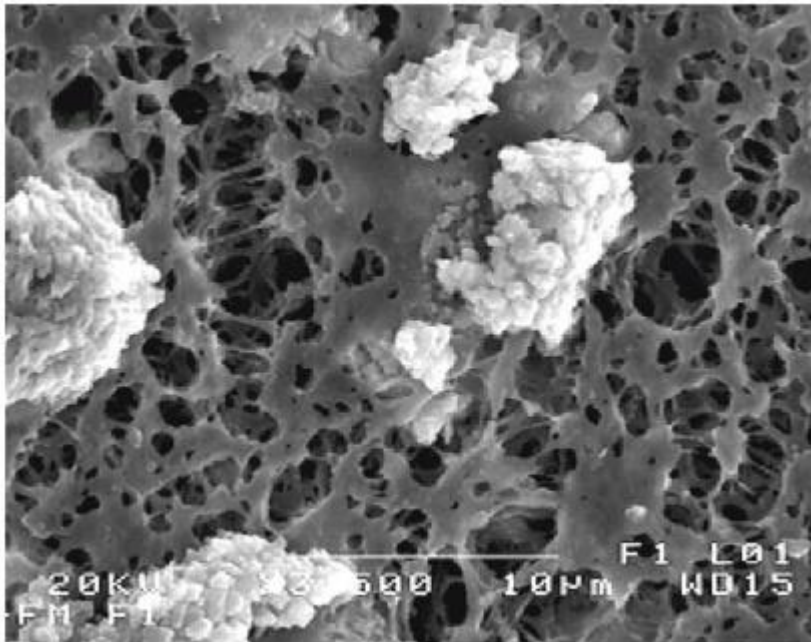


Se debe minimizar el factor de polarización

Aspectos operacionales

Ensuciamiento de la Membrana.

Se presenta tanto como resultado de la polarización por concentración, como también por la afinidad entre compuestos de la alimentación y la membrana, tales como aceites, grasas, proteínas, compuestos orgánicos, iones metálicos, microorganismos, etc.

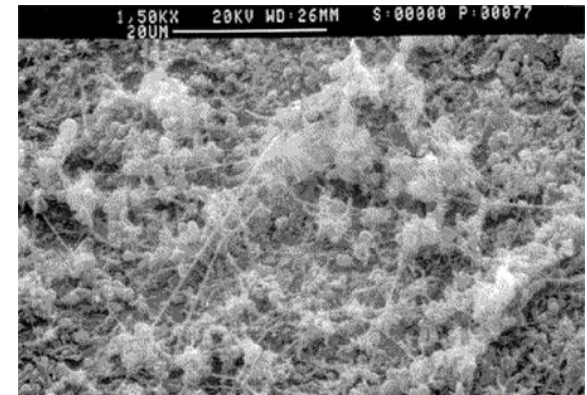


Precipitación de carbonato cálcico



Suciedad orgánica

Crecimiento bacteriano



Limpieza química de las membranas

La eliminación de precipitados se logra a menudo a través de la limpieza con un ácido orgánico, por ejemplo ácido cítrico o ácido sulfámico o con productos químicos quelantes tales como EDTA.

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 (secuestrantes).

Las biocapas son eliminadas de manera 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 emulsionantes tales como el sulfato laurílico de sodio.

Recuperación de energía del rechazo

Agua de mar
Caudal = 100
Conc. = 38 g/L
Presión = 70 bar

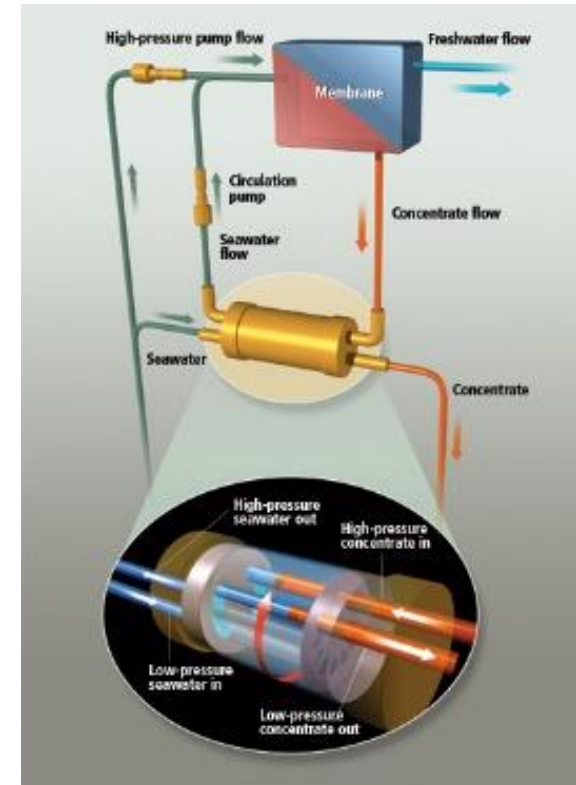
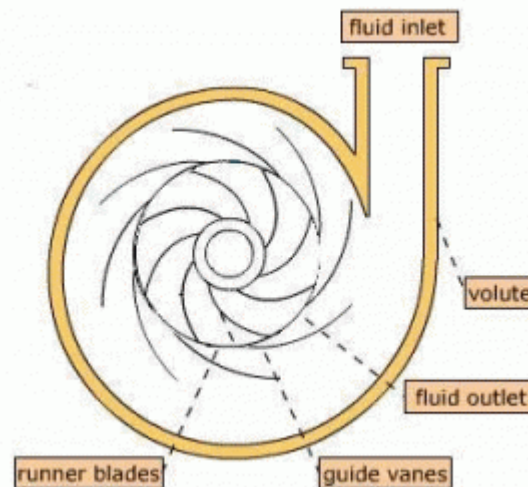


Agua dulce
Caudal = 45
Conc. = 0,5 g/L
Presión ~ 1 bar

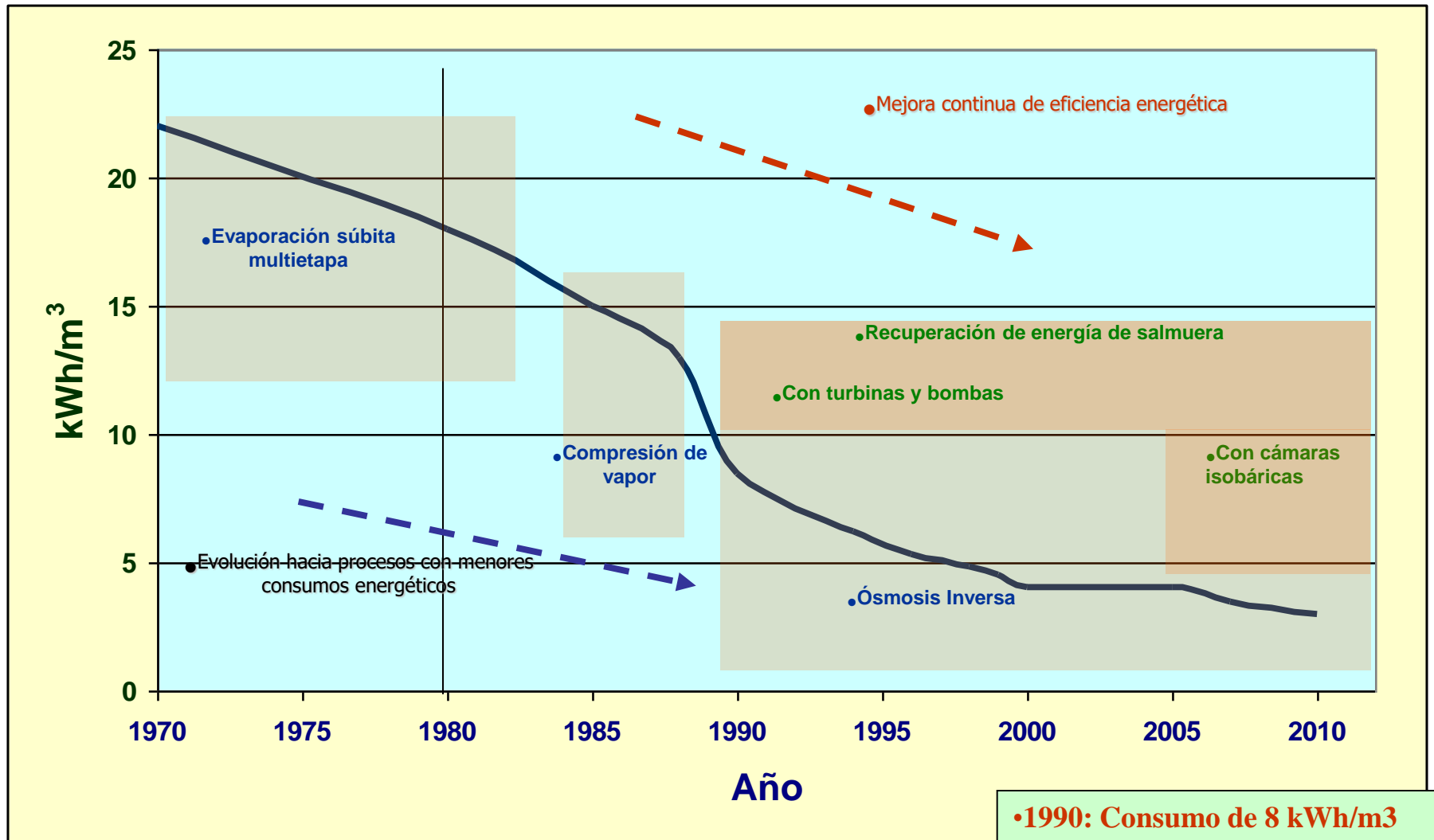
Rechazo
Caudal = 55
Conc. = 69 g/L
Presión ~ 70 bar

Sistemas de recuperación de energía

- TURBINAS PELTON, FRANCIS, etc.
- SISTEMAS DE INTERCAMBIO DE PRESIÓN



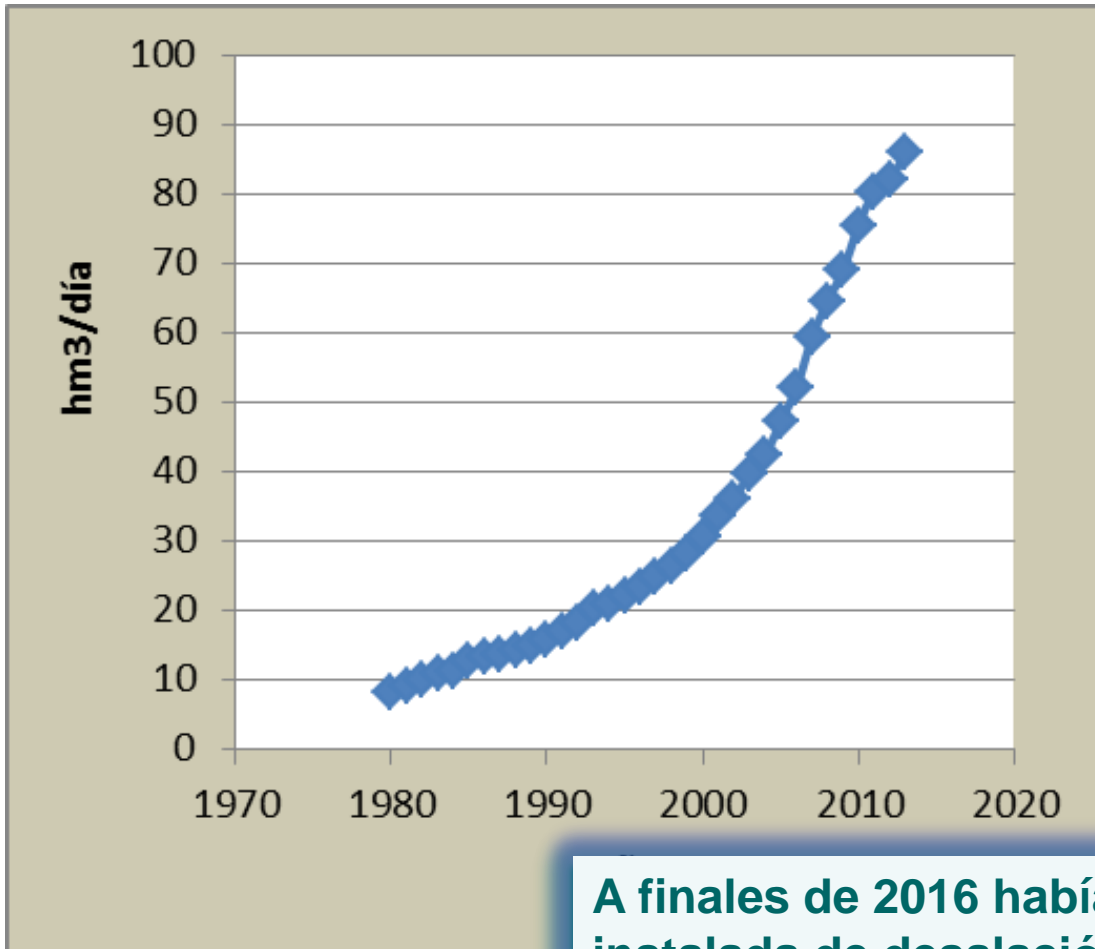
Evolución del consumo de energía. Datos de desaladoras en España



Actualmente consumo específico de 2,5 kWh/m³

- 1990: Consumo de 8 kWh/m³
- 2000: Consumo de 4 kWh/m³
- 2010: Consumo de 3 kWh/m³

Evolución de la producción de agua desalada en el mundo

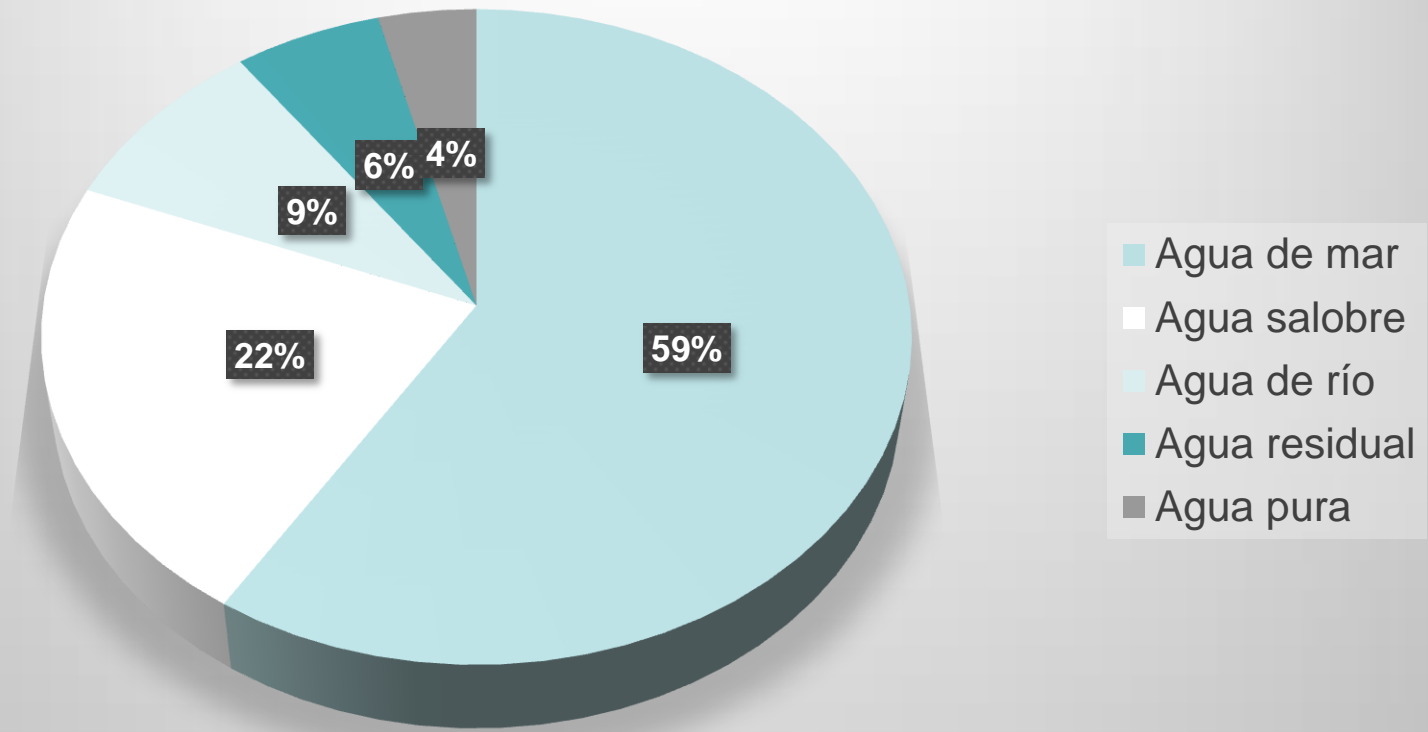


Más de 17.000 desaladoras en el mundo

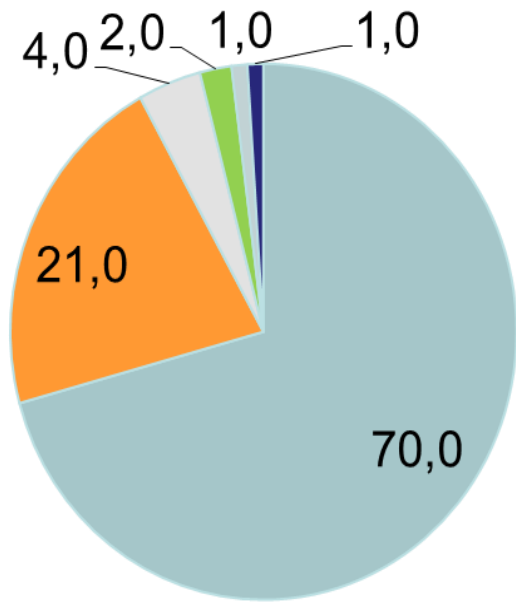
A finales de 2016 había una capacidad instalada de desalación en el mundo de 97 hm³/día (aprox. 35.000 hm³/año)

Origen del agua desalada

Distribución de la capacidad total instalada por tipo de alimentación

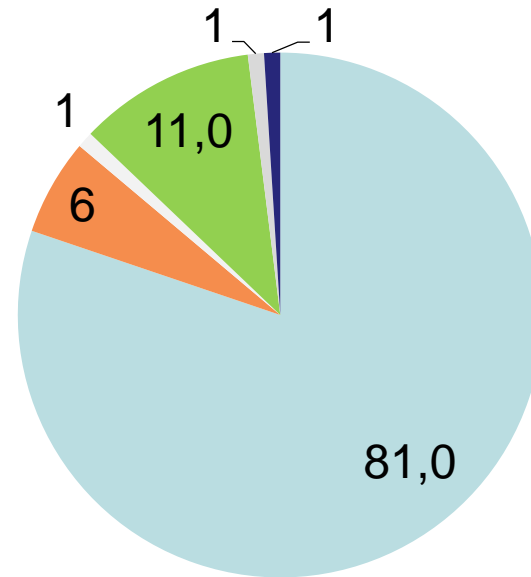
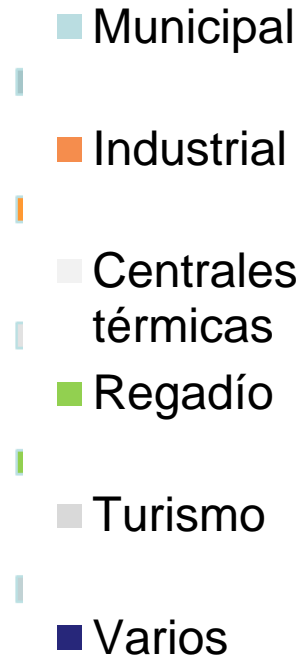


Usos del agua desalada



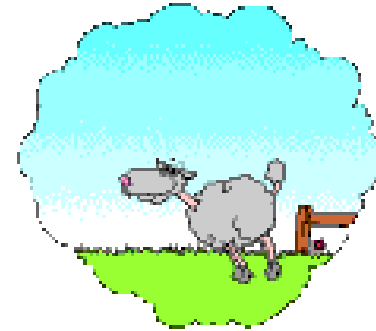
(IDA Yearbook 2016-2017)

Usos en el mundo



Usos en España

Principales inconvenientes que plantea la desalación



➤ **Consume energía**



➤ **Hay que evacuar los rechazos**



➤ **Coste de la producción de agua**

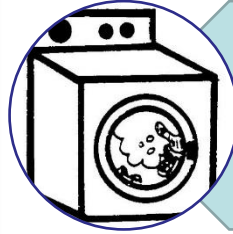


Consumo de energía

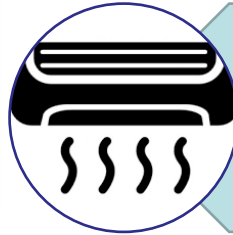


El consumo de energía total de una planta depende de la calidad del agua a tratar. Aproximadamente puede variar entre 1,2 kWh/m³ cuando se trata agua salobre de 5 g/L de sales disueltas, y 4 kWh/m³ si se desala agua de mar

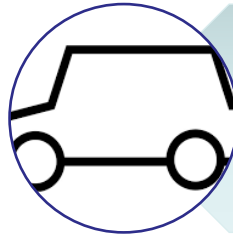
La importancia relativa de estos consumos puede evaluarse si se compara con la energía necesaria para disponer de otros bienes necesarios, como alimentos, ropa, calefacción y refrigeración, transporte, entretenimiento, etc



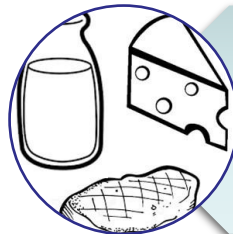
Una familia de 4 personas consume en casa unos 600 litros de agua al día. Si toda el agua consumida procediera de agua desalada del mar, el consumo de energía asociado sería de 2,4 kWh.



2-3 horas de aire acondicionado en dos habitaciones consumen 4 a 9 kWh.



Hacer un recorrido de 15 km en un coche eléctrico consume 2,5 kWh, y en un coche de gasolina 4 kWh.



Si se consume un litro de leche al día, la energía necesaria para producir este litro de leche es de 4 kWh. También se necesitan 4 kWh para producir 300 g de queso, y más de 30 kWh para producir medio kg de carne de ternera

Impacto ambiental de las desaladoras. Vertido de rechazos

El rechazo o salmuera es agua de mar o salobre concentrada en sales, sin otros componentes tóxicos

Agua de mar: aproximadamente 38 g/l de sales

Agua de rechazo: aproximadamente 72 g/l de sales

Actualmente en los proyectos de desalación en España se exige:

Estudios previos de impacto ambiental en el medio biótico y abiótico)

Estudio de alternativas para el vertido (emisario, mezcla previa con agua de mar, difusores, etc.)

Modelos de dilución del vertido

Seguimiento de parámetros ambientales y de afección de especies (*Posidonia oceanica*)



¿Cuanto cuesta desalar?

Depende del tipo de agua a desalar, de la producción, de la ubicación y de la calidad final



Captación

Pretratamiento



Desalación por OI



Postratamiento



Se puede considerar intervalos de coste típicos de 0,6-1,0 euros/m³ cuando se desala agua de mar y de 0,2-0,5 euros/m³ cuando se desalan aguas salobres

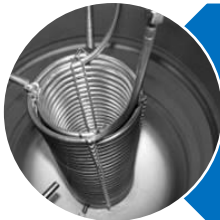
Las grandes ventajas: calidad y seguridad



Agua de excelente calidad, libre de todo tipo de contaminantes



Agua con muy bajo contenido en sales, lo que facilita su reutilización una vez utilizada y depurada



Mejora la vida útil de elementos sensibles a la dureza, como calderas, circuitos de calefacción y refrigeración, lavadoras (también se precisa menor consumo de detergentes), etc.



Abastecimiento seguro, independientemente de la climatología

Se puede concluir

La desalinización de aguas salobres, agua de mar y aguas residuales representa una opción para incrementar los recursos de agua en zonas deficitarias.

La tecnología de ósmosis inversa es robusta, está suficientemente probada, y permite desalar agua de cualquier procedencia.

La calidad del agua obtenida permite su uso como potable así como en la industria y regadío

Los factores limitantes pueden ser el consumo energético y los costes, por lo que siempre hay que comparar con otras posibles alternativas

Retos para el futuro



Reducción de impactos ambientales

IoCER

Resolver el problema de las salmueras en interior (viable económicamente)



Reducción del consumo de energía



Incremento del uso de energías renovables



Prevención y protección contra eventos marinos; blooms de algas, tsumanmis, contaminación marina, etc.



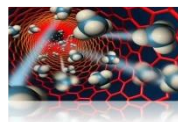
Desarrollo de membranas con mayor permeabilidad, resistencia al ensuciamiento y a los oxidantes



Flexibilidad y gestión de la producción y paradas de las instalaciones



Mejora de la apreciación pública,



Quizá cambios en la tecnología?

Gracias por la atención



Aguadores en Elche 1931



Lunes, 26 de agosto, 1996

BENIDORM - LA MARINA

Los alojamientos adquieren cubas de 10.000 litros a 5.000 pesetas para mantener llenos sus aljibes

Hoteles de Benidorm compran agua de pozos privados para asegurar el suministro al cliente

Numerosos hoteles de Benidorm llevan todo el verano comprando agua procedente de pozos privados para mantener llenos sus aljibes y garantizar el suministro a sus clientes. La grave sequía que asola el Levante español y ha provocado cortes en el suministro de ocho horas diarias en Benidorm, ha obligado a las empresas a adoptar esta medida para asegurar el agua de forma permanente. El agua adquirida procede de sendos pozos de propiedad privada situados en El Albir (Alfaz del Pi) y se vende al precio de 0,5 pesetas el litro. En los días de mayor afluencia turística, algunos hoteles han recibido hasta 180.000 litros diarios.

J. FAURO

La falta de agua se ha convertido en un negocio. «Poco lucrativo», según fuentes próximas a la empresa que se está encargando del suministro. Cada día, numerosos hoteles de Benidorm encargan agua a una empresa local para llenar los aljibes y asegurarse de que sus clientes podrán darse una ducha al llegar de la playa pese a las ocho horas de restricciones nocturnas que padece la ciudad.

Varios propietarios de hoteles han confirmado que las cubas de la empresa Orozco suministran agua a sus establecimientos de forma casi diaria. Fuentes cercanas a esta empresa informaron, por su parte, de que el agua –potable, subrayaron– que llega a los hoteles «está contribuyendo a salvar la temporada».

Transportes Orozco es la empresa encargada de abastecer a las empresas hoteleras. Camiones de esta firma acuden cada día a unos terrenos privados del Camino Viejo de Alta, en El Albir, para cargar cubas con una capacidad de 10.000 litros. El hotel paga cada cuba a 5.000 pesetas, indicaron las mismas fuentes. «A ese precio, prácticamente estamos regalando el agua. Que conste que no