



Mejor Riego
para Chile



Conceptos de hidráulica, bombeo e impulsión de fluidos

Autores: PhD. Aldo Saavedra Fenoglio, Universidad de Santiago de Chile;
PhD. Hugo Valdés Riquelme, Universidad Católica del Maule, Talca; y, PhD. Carlos Zúñiga Espinoza, INIA La Cruz.

INFORMATIVO INIA LA CRUZ N° 040

DOCUMENTO TÉCNICO INIA - CNR N° 40, AÑO 2022

Introducción

Los procesos de desalación tienen una fuerte dependencia de los fenómenos hidráulicos. Por lo tanto, se hace necesario el estudio de las variables que influyen en el proceso, tales como, presión, flujo y energía por el transporte del fluido.

Un líquido que circula por el interior de un ducto cerrado, por ejemplo una tubería, corresponde a la situación física de flujo confinado. El gradiente que permite el flujo es una diferencia de presión, de tal forma que cuando aumenta o disminuye el gradiente de presión, la velocidad aumenta o disminuye. La energía necesaria para impulsar el líquido es entregada externamente por un equipo electromecánico o bomba.

En este informativo se describen conceptos básicos sobre fluidodinámica que influyen en el proceso de osmosis inversa (Figura 1).

Presión estática y dinámica

La presión estática es la que se ejerce en todas las direcciones dentro de una cañería o un estanque, en la misma dirección del fluido, en dirección contraria y en dirección perpendicular, sobre las paredes del mismo. Mientras que la presión dinámica depende de la velocidad y la densidad del fluido, ya que cuando los fluidos se mueven en una cañería, la inercia del movimiento produce un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. Esta fuerza se produce por la acción de la presión conocida como dinámica.

Tipos de flujo

El flujo se clasifica de acuerdo al régimen: laminar, transición y turbulento. El flujo laminar se presenta a bajas velocidades (bajos caudales) y se caracteriza por un movimiento en capas ordenadas (láminas), entre las cuales existen gradientes de velocidad. Para el caso de una tubería, el perfil de velocidades es parabólico. El flujo turbulento se presenta a altas velocidades, en el cual se visualizan torbellinos, mezclamiento, es un movimiento desordenado. Para el caso de una cañería, el perfil de velocidades tiende a ser plano, sin producirse capas de fluido. Entre ambos tipos de flujo existe el denominado flujo de transición cuya descripción matemática es compleja.

El tipo de régimen de flujo se cuantifica mediante el número de Reynolds (Re):

$$Re = \left(\frac{D \cdot \langle v \rangle \cdot \rho}{\mu} \right) \quad (1)$$

donde, D es el diámetro de la cañería (m), v es la velocidad media del fluido (m/s), ρ la densidad del fluido (kg/m³) y μ la viscosidad del fluido (kg/m s). En una cañería si $Re < 2100$ es un régimen laminar y $Re > 4000$ es régimen turbulento.

Balance de energía mecánica: Ecuación de Bernoulli

Para determinar la potencia de bombeo y/o las pérdidas de energía mecánica de un líquido que circula por tuberías, se aplica la Ecuación de Bernoulli:

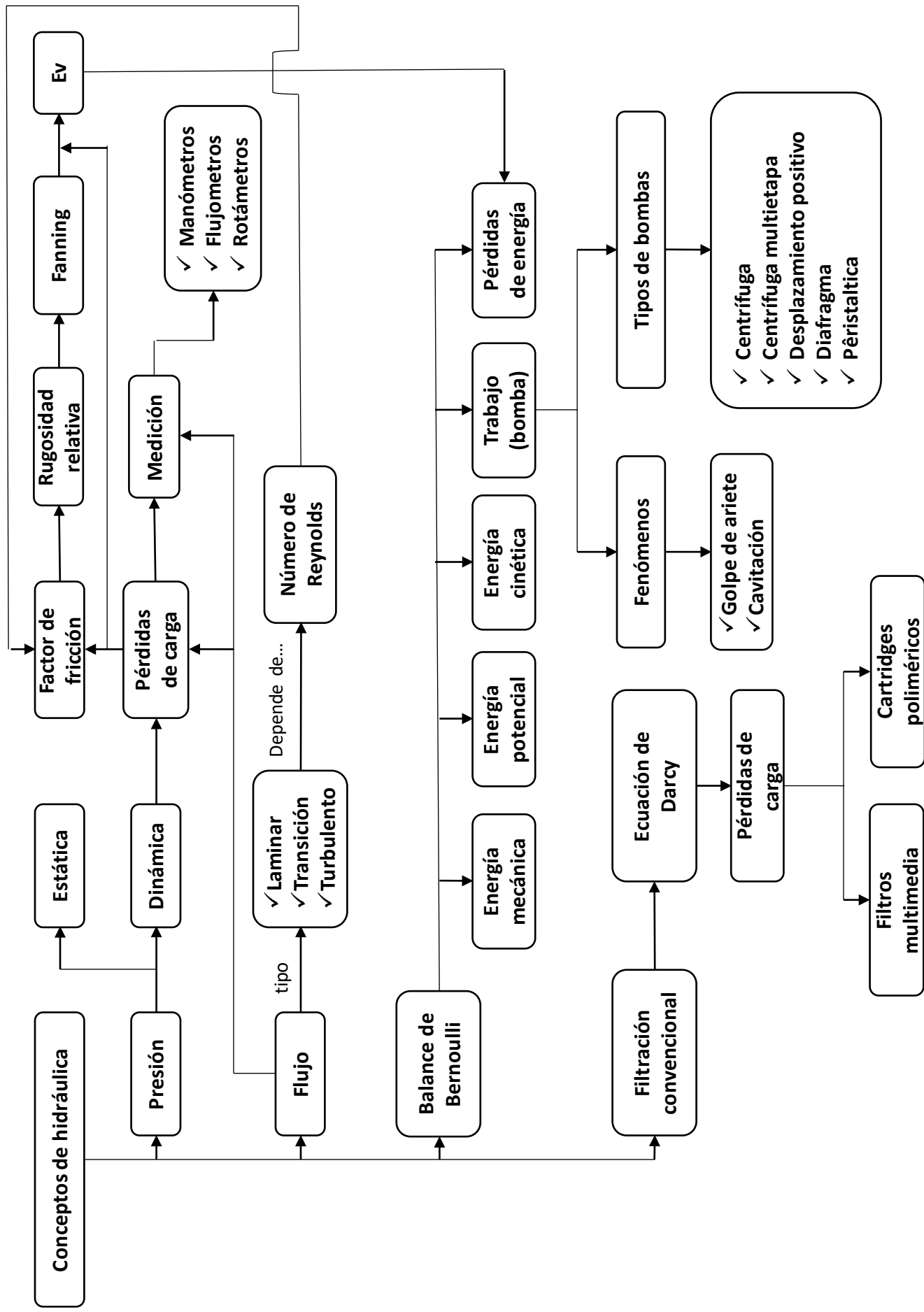


Figura 1. Mapa conceptual de los criterios de hidráulica para el proceso de osmosis inversa.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \cdot \Delta \langle v \rangle^2 + W + \sum \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 \cdot \frac{L}{D} \cdot 4f \right) + \sum \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 \cdot E_v \right) = 0 \quad (2)$$

donde,

$\frac{\Delta P}{\rho}$ es la diferencia de energía de presión,

$g \cdot \Delta z$ es la energía potencial o diferencia de altura,

$\Delta \frac{1}{2} \langle v \rangle^2$ es la variación de energía cinética,

$(+ W)$ es el trabajo absorbido por el fluido debido al bombeo,

$\sum \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 \frac{L}{D} 4f \right) = h_f$ son las pérdidas de energía mecánica en conducciones rectas (cañerías),

$\sum \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 E_v \right)$ son las pérdidas de energía mecánica en accesorios o singularidades (válvulas, codos, etc.).

El parámetro f se denomina "factor de fricción", número adimensional que cuantifica las pérdidas de carga (pérdidas de energía mecánica) provocadas por la fricción del fluido circulante por una tubería.

Pérdidas de carga

Para mantenerse en flujo, el fluido debe vencer las fuerzas de roce o fricción consigo mismo y con las paredes internas del tubo. A partir de un balance de fuerzas involucradas, se obtiene:

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{-\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \langle v \rangle^2} \right) \quad (3)$$

En la literatura técnica y en los catálogos de sistemas de bombeo se emplean dos factores de fricción diferentes: Fanning (f_F o f) y Darcy (f_D) (o también factor de Moody), donde se cumple que:

$$f_D = 4f_F \quad (4)$$

Todas las tuberías presentan imperfecciones o rugosidades (ϵ) superficiales, las cuales deben obligatoriamente considerarse debido a que incrementan las pérdidas de energía mecánica. Los valores de rugosidad se determinan experimentalmente y se encuentran tabulados para diferentes tipos de materiales empleados en cañerías (Tabla 1).

Tabla 1. Valores típicos de rugosidad de materiales empleados en ductos de fluidos.

Tipo de material	Rugosidad superficial (mm)
Tubos estirados de acero	0,00152
Acero comercial o hierro fundido	0,0457
Hierro fundido asfaltado	0,122
Hierro galvanizado	0,152
Hierro fundido	0,259
Cobre	0,260
PVC hidráulico	0,350
Madera	0,183 - 0,914
Concreto	0,305 - 3,05
Acero remachado	0,900 - 9,00

De consideraciones fluidodinámicas, se encuentra que el valor de fricción, f , depende del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad relativa (ϵ/D) cuando el régimen de flujo es turbulento (Figura 2).

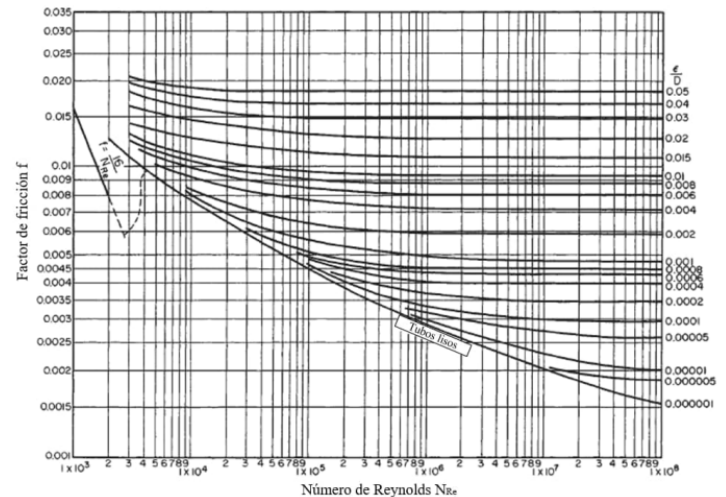


Figura 2. Diagrama del factor de fricción en función del número de Reynolds.

Para las pérdidas de energía mecánica en válvulas, codos, entradas o salidas de fluido en tuberías, se utilizan valores que se informan en la bibliografía (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de los factores de pérdida de energía mecánica por fricción para accesorios.

Tipo de obstáculo	Coefficiente de fricción (E_v)
Contracción brusca	$0,5 \cdot (1 - \beta^*)$
Salida tubería - estanque	1
Entrada estanque - tubería	0,5
Ensanchamiento brusco	$(1 - \beta^*)^2$
Válvula de globo (abierta)	5,8
Válvula de diafragma (abierta)	2,3
Codo 90°	0,75

Nota: $\beta^* = (\text{área sección menor} / \text{área sección mayor})$, $\beta^* < 1$.

Instrumentos para presión y flujo

Un manómetro de presión es un indicador analógico utilizado para medir la presión de un fluido, en este caso empleado para medir la presión del agua de alimentación (agua salobre) y del concentrado. Son dispositivos analógicos con un dial circular y un puntero accionado mecánicamente que han estado en uso durante décadas. Actualmente, el manómetro analógico está siendo sustituido por manómetros digitales con una pantalla digital y características adicionales, tales como incorporación de alarmas y transmisión inalámbrica del valor indicado. La medición de la presión es importante debido a que las membranas están diseñadas para soportar un cierto valor de presión. La medición de los cambios de presión durante la desalación es un factor importante de considerar, ya que permite detectar posibles problemas de ensuciamiento y daño de las membranas.

Por otro lado, los flujómetros o caudalímetros son instrumentos que se usa para medir el caudal másico o volumétrico de un fluido. En este caso se utiliza para medir los flujos de alimentación, de permeado y de concentrado. Existen caudalímetros que utilizan distintos principios de físicos de medición:

- Presión diferencial: placa orificio, tobera, tubo Venturi y tubo Pitot.
- Área variable: rotámetro.
- Velocidad: turbina y sonda ultrasónica.
- Fuerza: placa de impacto.
- Tensión inducida: medidor magnético.

En el caso de una planta industrial es conveniente utilizar un caudalímetro digital que permita registrar en línea el caudal de las diferentes corrientes del proceso de desalación, ya que los cambios drásticos o paulatinos de caudal son también un indicador de problemas de operación de las membranas.

Bombeo de líquidos en osmosis inversa

Las bombas impulsan la alimentación líquida hacia los bancos de membranas. Esta es la etapa que consume más energía, por esto es muy importante seleccionar la bomba en función de diferentes parámetros: (1) rendimiento, (2) mantenimiento, (3) nivel de ruido, (4) presión de bombeo y (5) caudal de producción.

Las bombas pueden operar a presiones altas cercanas a 60-70 bar para agua de mar y 10-25 bar para agua salobre. En estos rangos de presión, la potencia de la bomba está entre 4 y 100 hp. Las bombas de alta presión pueden ser de dos tipos: bombas de desplazamiento positivo o alternativas y bombas centrífugas.

Las bombas de desplazamiento positivo de simple efecto, consisten en una cámara provista de un pistón que se llena de agua cuando este retrocede y bombea el líquido cuando avanza. Las bombas alternativas de doble efecto, que a diferencia de las de simple efecto, cuando retrocede el pistón se llena una de las cámaras de presión en una de sus caras, y al mismo tiempo, con la otra cara, impulsa el fluido de otra cámara contigua invirtiendo la situación cuando el pistón avanza. Las bombas se accionan con un motor eléctrico acoplado directamente al eje del piñón de ataque, a través de variadores-reductores o mediante un sistema de poleas y correas. En una bomba alternativa, el caudal instantáneo tanto en la entrada como en la salida es igual a la suma de caudales aspirados e impulsados en cada momento por cada uno de los émbolos. Las bombas de desplazamiento positivo se emplean en plantas desaladoras de agua de mar debido a que suministran elevadas presiones, típicamente entre 30 y 60 bar. Se utilizan en plantas pequeñas (3 a 20 m³/h) y medianas (hasta 130 m³/h) cuando se precisan altos rendimientos energéticos en la impulsión y, en consecuencia, bajos consumos específicos de energía.

Las bombas centrífugas multietapas tienen rendimientos inferiores a las bombas de desplazamiento positivo, pero son las más utilizadas en aguas salobres debido a que son confiables y precisan de un mantenimiento bastante sencillo. Estas bombas requieren dos tipos de válvulas: una válvula reguladora en la línea de descarga de la bomba para controlar la presión/caudal de ingreso a los módulos de ósmosis inversa y una válvula de contrapresión para recircular el caudal en exceso.

Por otro lado, en las plantas de desalación se utilizan las bombas dosificadoras (diafragma, peristálticas) para la dosificación de productos químicos como hipoclorito sódico, ácido clorhídrico, dilución de hidróxido de sodio, preparación de lechada de cal, anti-incrustantes, anticorrosivos, etc.

Cavitación y Golpe de ariete

Algunos problemas hidráulicos que pueden verificarse durante la operación de una planta de OI son cavitación de las bombas y golpes de ariete.

La cavitación ocurre en la zona de succión de la bomba, donde se encuentran las condiciones locales de baja presión, lo que provoca que el líquido se transforme en vapor a la entrada del rodete. Este vapor es transportado hasta la zona de descarga de la bomba donde el vacío desaparece y el vapor del líquido es nuevamente comprimido debido a la presión de descarga. Se produce entonces una violenta caída de presión sobre la superficie del rodete. Un rodete que opera bajo condiciones de cavitación en la succión, terminará presentando fallas por destrucción del rodete, desgaste prematuro del sello mecánico, picaduras, abrasión y erosión de las partes metálicas de la bomba que están en contacto con el fluido.

El golpe de ariete se origina al cerrar bruscamente una válvula instalada en el extremo de una tubería de cierta longitud. Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobrepresión generada llegará entre 60 y 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en los accesorios instalados en los extremos. Un método para evitar el golpe de ariete es instalar ventosas de aireación.

Filtración convencional

La filtración permite eliminar partículas en suspensión de tamaños entre 0,01 y 100 micrones, y puede emplearse con o sin coagulación/floculación. Un filtro convencional opera atrapando materiales utilizando medios granulares, tales como arena, cuarzo, grava o carbón activado. La Figura 3 muestra los criterios de filtración para agua sin tratamiento, destacando que el objetivo es reducir la turbidez a un nivel igual o menor a 0,2 NTU, previo a la bomba de alta presión. Se observa que el filtro multimedia, el filtro floculador y el flocodecantador soportan un agua de alimentación de hasta 50, 100 y 1.000 NTU, respectivamente. La experiencia indica que cuando el agua presenta una turbidez sobre 10 NTU se requiere una prefiltración.

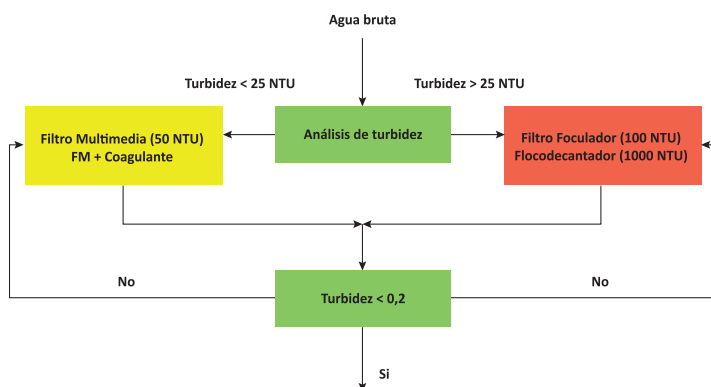


Figura 3. Esquema de los criterios de filtración según turbidez.

Los filtros multimedia constan de una o más capas de medios filtrantes, sean o no de arena, se conocen como "Filtración sobre arena", pues en muchos casos se trata de distintos materiales de granulometría variable, que se colocan unos sobre otros, en capas de distinto espesor. Un filtro multimedia puede reducir el SDI del agua de alimentación a valores inferiores a 2, siempre que el SDI original sea menor que 10. Cuando el agua de alimentación presenta valores de SDI superiores a 10, se requerirá forzosamente realizar floculación-coagulación, antes de que el agua ingrese al

filtro. Cuando la filtración multimedia no es suficiente para abatir la turbidez y alcanzar los niveles exigidos (1 NTU y SDI < 5), o los filtros se obstruyen con demasiada rapidez, se recurre a una segunda etapa de filtración de las mismas características. Los filtros son de mismos materiales y medios filtrantes descritos anteriormente. Esto determina que, si en la primera filtración la velocidad está entre 8 y 10 m/h, en la segunda será entre 14 y 18 m/h.

Por otro lado, los filtros de cartucho son componentes imprescindibles en una planta de osmosis inversa, puesto que la prefiltración con arena y/o multimedia sólo logra un nivel mediano de filtración, considerado insuficiente para mantener las membranas en buen estado. El nivel de filtración al que los fabricantes de membranas recomiendan es de máximo 5 µm (absolutos), valor que garantiza un funcionamiento continuo sin pérdidas relevantes de la productividad. En ciertas ocasiones se recomienda incluso descender hasta un nivel de filtración de 1 µm. Debe considerarse que el espacio disponible entre dos capas adyacentes de membranas de un módulo espiral OI, tiene valores entre 50 y 500 µm aproximadamente, correspondiente al ancho del canal por el que circula la alimentación. Entonces, las partículas menores de 5 µm que no sean retenidas por los filtros de cartuchos serán arrastradas por estos canales junto al flujo de agua que circula paralelo a la superficie de la membrana, para salir finalmente con la corriente de rechazo.

Finalmente, cuando se utilizan resinas de intercambio iónico como etapa de pretratamiento (ablandamiento) o postratamiento (eliminación de boro y/o arsénico no rechazado por la osmosis inversa), también deberán considerarse las pérdidas de carga en los lechos empacados con resina y los procedimientos de regeneración y limpieza de los medios adsorbentes. Para estas operaciones se utilizan bombas, cuyas condiciones de operación deberán también ser determinadas.

Conclusiones

El proceso de osmosis inversa cuenta con múltiples etapas dependientes de la fluidodinámica e hidráulica. Las empresas fabricantes tienen en cuenta los fenómenos indicados anteriormente al momento de diseñar, pero el usuario es quien debe tener la precaución de verificar el correcto funcionamiento de la red hidráulica por medio de los dispositivos de control y regulación para evitar fallas y detectar problemas.

INIA LA CRUZ: Chorrillos N° 86 - La Cruz, Región de Valparaíso, Chile.
CNR: Av. Libertador Bernardo O'Higgins #1449, Torre I, Piso 4, Santiago

Este informativo es un material de difusión y transferencia, que forma parte del convenio CNR / INIA "Mejoramiento en la operación de plantas de ósmosis inversa de uso en riego agrícola mediante el fortalecimiento de la capacitación, extensión y transferencia tecnológica a beneficiarios de proyectos de riego".