

potabilización-76

J. M. TOBIO, Profesor de Investigación †

393 - 2

Al cerrar este número recibimos la dolorosa noticia de la muerte repentina del Dr. Tobío, al cual desde estas breves, pero sentidas líneas, queremos dedicar un afectuoso recuerdo: como antiguo y eficiente colaborador, como compañero de tantos años de trabajo y, sobre todo, como entrañable y muy querido amigo.
¡Descanse en paz!

sinopsis

En este trabajo, que es continuación de otro publicado por el autor, se enumeran las particularidades más interesantes en el campo de la potabilización, con una breve aportación bibliográfica cerrada a comienzos de 1976. Se comenta el Decreto 926/1973, que regula en nuestro país la financiación de las plantas potabilizadoras, y se citan las características más salientes de las plantas duales (agua y energía), ósmosis inversa, y congelación, para terminar con un apéndice dedicado al cálculo elemental de este tipo de instalaciones tanto en lo que se refiere a costes de primera instalación como a gastos de explotación y conservación.

1. INTRODUCCION

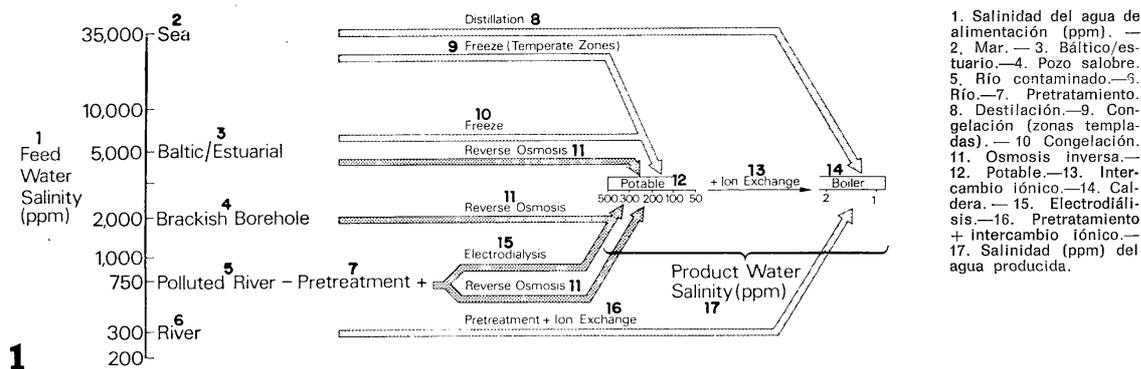
Con la publicación del Decreto 926/1973, de 26 de abril («B. O. del Estado» de 14 de mayo de 1973), cobra actualidad un tema que hemos tratado ampliamente en un trabajo anterior (1). En este Decreto se dictan normas sobre ayuda del Estado a los abastecimientos de aguas de los que formen parte plantas de desalinización de aguas marinas o salobres.

En su parte dispositiva el Decreto 926, si bien no fija los porcentajes de ayuda (pues éstos se establecerán en Consejo de Ministros, a propuesta de los Ministerios de Obras Públicas e Industria), habla de subvenciones a fondo perdido para este tipo de instalaciones, así como de la concesión de créditos en concepto de anticipo reintegrable, previa la presentación de los proyectos y presupuestos correspondientes. Todo ello se refiere tanto a las plantas potabilizadoras propiamente dichas como a las plantas llamadas duales, entendiéndose como tales aquellas en las que, además de producir agua dulce, se obtenga energía eléctrica como subproducto, que, según el citado Decreto, será enviada a la red exterior de energía con carácter preferente.

Todo lo anterior significa que el proyecto de grandes instalaciones de potabilización deja de recaer exclusivamente sobre las empresas privadas, y dado que las inversiones en este tipo de plantas suelen ser de gran entidad, esto puede suponer un gran alivio económico para los ayuntamientos o localidades que tengan problemas en sus redes de abastecimiento de agua potable, e incluso de riegos.

Después de remitir a nuestros lectores al trabajo citado, en lo que respecta a generalidades del problema, consumos, costes, producción y transporte y algo de historia sobre la evolución de esta clase de industria, queremos dar en este breve artículo una visión panorámica de los últimos acontecimientos y avances que se han producido en este campo.

(1) J. M. Tobío: **Potabilización del agua de mar**, en «Informes de la Construcción», núm. 231, junio (1971).



2. GENERALIDADES

No es ningún descubrimiento decir que el desarrollo de muchas regiones del mundo —y también de España— se ha visto frenado por la falta de agua potable. Los problemas de transporte, energía, construcción civil y otros son fácilmente solubles gracias a los medios que la tecnología pone a nuestro alcance. El problema de la carencia de agua en una determinada localización ya es otra cosa. Ya no constituye solución, al menos una solución práctica, pensar en llevar el agua desde otras regiones donde abunda (?), situadas a centenares de kilómetros. Las ingentes obras de ingeniería que ello supone —en España tenemos algunos ejemplos—, los costes y el problema de las pérdidas son otros tantos factores limitativos.

Por otra parte, aquellas regiones que se supone abundantes en agua potable ya no consienten, al menos fácilmente, que se les «robe» una parte de su preciado líquido. En el caso de regiones insulares, por otra parte, la única solución posible es el montaje de plantas de potabilización.

Pero estas plantas deben ser racionales, deben pensarse y proyectarse de una forma consciente, no olvidando en ningún momento que la solución ideal no existe.

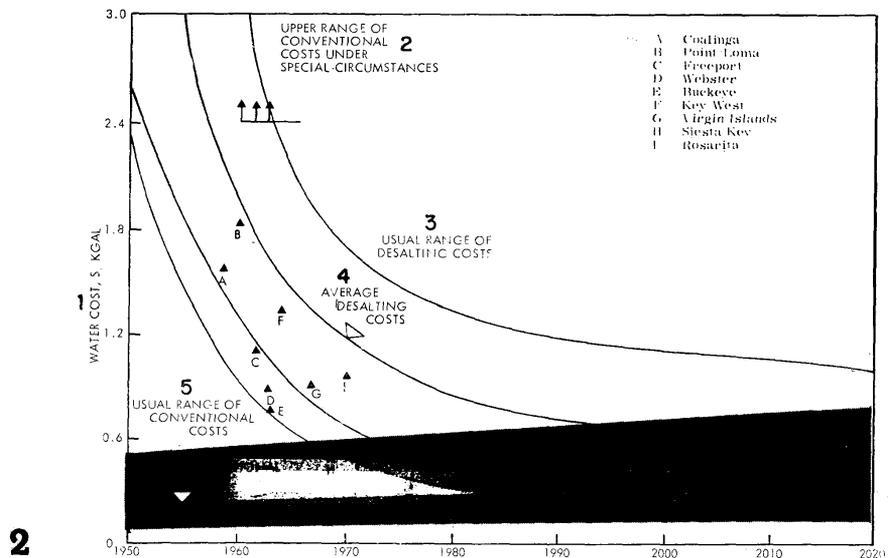
Un primer punto a tener en cuenta es que no todos los sistemas de potabilización se adaptan igualmente bien para todos los casos. El contenido total en sales del agua de partida, agua salobre, es el primer parámetro. El punto final es el tipo de agua que se pretende obtener. Aun cuando la O.M.S. permite para el agua de beber hasta 1.000 ppm (partes por millón) de sales, es evidente que un agua final con 500 ó 300 ppm será más agradable al usuario.

En forma esquemática, la figura 1, tomada de (1), muestra que el agua salobre que pretendemos purificar puede ir desde un máximo de 35.000 ppm (agua de mar media) hasta aguas de río contaminadas con sólo unos cientos de ppm. El producto resultante puede ser con un máximo de pureza (agua para calderas) de solamente unas cuantas ppm hasta aguas para uso doméstico con 500 ppm.

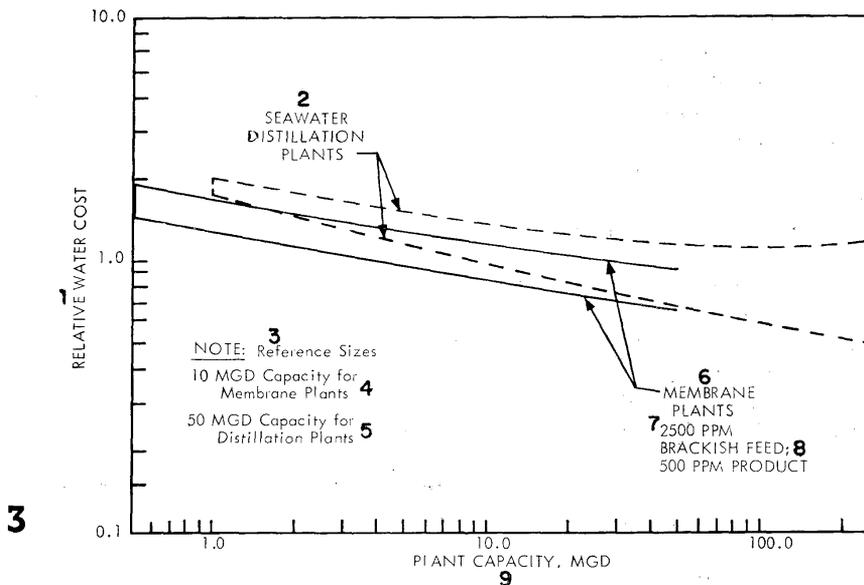
El diagrama indica en forma muy clara que, de los diferentes sistemas de elección, solamente los de destilación térmica y congelación son aplicables directamente al agua marina. Para aguas de estuarios y otras zonas en las cuales la salinidad viene disminuida por los aportes de los ríos, la elección ya puede ir hacia los sistemas de ósmosis inversa, y para las aguas de río con hasta 1.000 ppm, un pretratamiento químico o químico-físico seguido de una electrodiálisis puede resultar conveniente. En el extremo final tenemos las aguas de río que podríamos llamar normales, con menos de 500 ppm, para las cuales un tratamiento químico y un paso por un lecho de resinas puede resultar suficiente.

(1) Owen Pugh: **Desalinización**, en «Spectrum», núm. 99, 4 (1973).

1. Coste: \$/1.000 galones.
2. Altos costes convencionales bajo circunstancias especiales.
3. Margen usual de costes convencionales.
4. Costes convencionales medios.
5. Campo usual de los costes de potabilización.
6. Costes medios de potabilización.



1. Coste relativo del agua.
2. Plantas de destilación de agua marina.
3. Nota: tamaños de referencia.
4. 10.000.000 de galones/día para plantas de membrana.
5. 50.000.000 de galones/día para plantas de destilación.
6. Plantas de membrana.
7. Agua de alimentación: 2.500 ppm.
8. Agua obtenida: 500 ppm.
9. Capacidad de la planta (en millones de galones).

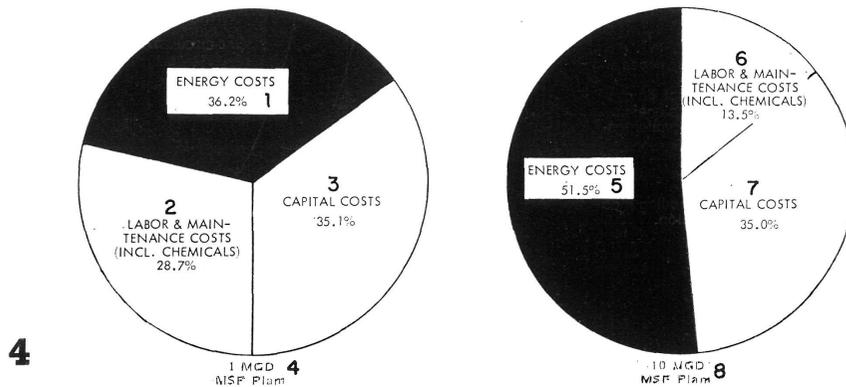


A modo de resumen podemos decir que los métodos de desalinización actuales caen en cuatro categorías:

La primera es la **destilación**, que tiene cinco versiones más o menos comerciales: los destiladores de tubo vertical (VTE), la destilación rápida multietapa (MSF), los multietapa multiefecto (MEMS), los de compresión de vapor (VCE) y la destilación solar (SS).

El segundo grupo de técnicas incluye los procesos que utilizan **membranas**. Son: la electrodiálisis, el agotamiento por transporte iónico y la ósmosis inversa. Los procesos con membranas son los más sencillos de todos los métodos de potabilización, pero hasta el presente solamente resultan prácticos frente a aguas de baja salinidad. Esto se debe, o bien a factores económicos, como en el caso de la electrodiálisis, o a no haberse encontrado, hasta ahora, membranas capaces de resistir al agua de mar en los procesos de ósmosis inversa monoetapa. Algunos autores anuncian —tal como Pugh (loc. cit.)— que tal proceso puede ser factible con agua de mar utilizando membranas de acetato de celulosa en un proceso bietapa, especialmente atractivo para unidades de pequeña capacidad.

1. Costes de la energía (36,2 %).
 2. Costes de mantenimiento y mano de obra, incluyendo productos químicos (28,7 %).—3. Costes de capital (35,1 %).—4. 1.000.000 de galones MSF.—5. Costes de energía (51,5 %).—6. Costes de mantenimiento y mano de obra, incluyendo productos químicos (13,5 %).—7. Costes de capital (35 %).—8. 10 millones de galones/día MSF.



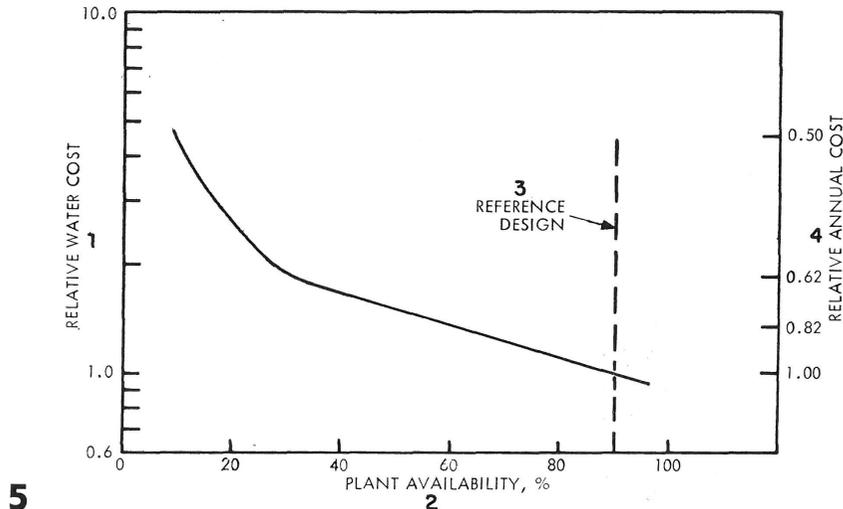
La tercera vía de trabajo corresponde a los métodos de **crystalización** y se bifurca en tres métodos principales: el compresor de vapor de congelación en vacío, la congelación con refrigerante secundario y la formación de hidratos. Los sistemas de congelación son, desde el punto de vista teórico, especialmente atractivos por varias razones. Suponen el mínimo en cuanto a requerimientos de energía; por trabajar a baja temperatura los problemas de corrosión son menores y pueden aplicarse a aguas de elevada salinidad (figura 1).

En cuanto al cuarto grupo de procedimientos, los procesos **químicos**, solamente uno ha podido colocarse en línea de competencia con los anteriores, el empleo de resinas cambiadoras de ion, sistema, por otra parte, bien conocido en el campo químico-técnico.

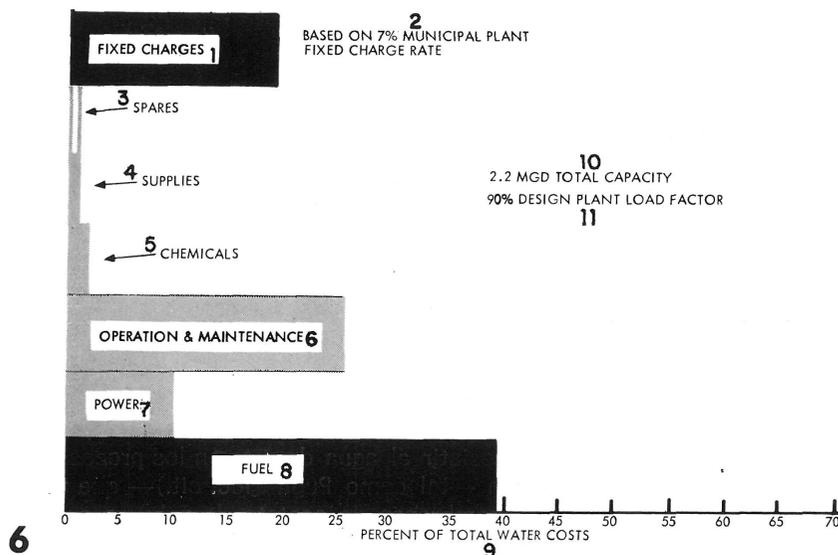
3. ASPECTOS ECONOMICOS

La figura 1 del trabajo de J. M. Tobío (loc. cit.) daba la evolución de costes del agua desali-

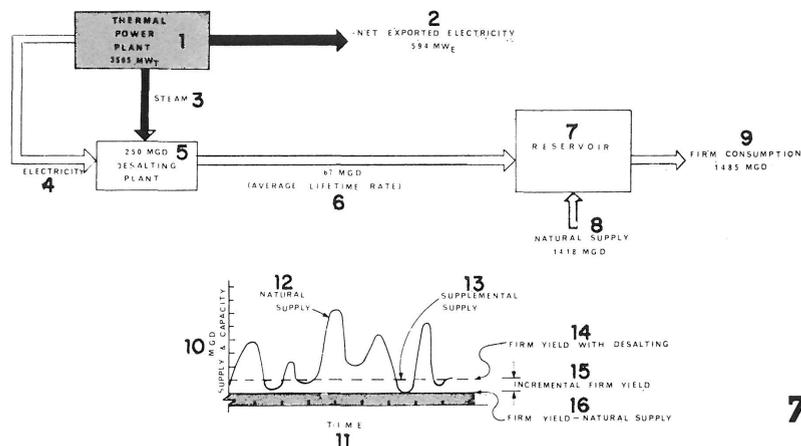
1. Coste relativo del agua.—2. Factor de utilización en %.—3. Utilización de referencia.—4. Coste relativo por año.



1. Cargas fijas.—2. Basado en un impuesto municipal del 7 %.—3. Recambios.—4. Suministros.—5. Productos químicos.—6. Operación y mantenimiento.—7. Energía eléctrica.—8. Combustible.—9. Porcentaje del coste total del agua.—10. Capacidad total: 2,2 millones de galones/día.—11. Factor de carga: 90 %.



1. Central térmica.
2. Electricidad enviada a la red: 594 Mw eléctricos.
3. Vapor.
4. Electricidad.
5. 250.000.000 de galones/día de agua potable.
6. 67.000.000 de galones/día (promedio durante la vida de la planta).
7. Depósito.
8. Agua natural: 1.418.000.000 de galones.
9. Rendimiento de consumo: 1.485.000.000 de galones/día.
10. Millones de galones: agua natural y desalinizada.
11. Tiempo.
12. Agua natural.
13. Agua suplementada.
14. Rendimiento efectivo con desalación.
15. Aumento del rendimiento.
16. Abastecimiento básico de agua natural.



nizada con previsión hasta el año 1980. Dicha figura debe ser actualizada por las gráficas de J. J. Strobel (1) (fig. 2), que abarcan previsiones hasta el año 2020. En ordenadas se indica el coste por 1.000 galones (en dólares) deducido de los costes actuales de varias instalaciones ya en funcionamiento (las letras corresponden a otras tantas plantas de proyecto y construcción americana), y la zona sombreada inferior es el precio previsto para el agua convencional en función del tiempo.

La gráfica superior indica los costes máximos de potabilización que el estado actual de las estadísticas hace suponer. La curva siguiente marca los costes medios probables deducidos de plantas ya en proyecto o en funcionamiento, tales como la B (Point Loma), F (Key West) e I (Rosarita). Las curvas inferiores han sido deducidas de otro tipo de plantas.

Es interesante notar que hacia el año 1995 se igualarán los costes del agua potabilizada y el agua convencional en una cifra aproximada de 9 ptas./m³. Como puede suponerse, éstos son datos medios estadísticos obtenidos por la O.S.W. de las 750 plantas de potabilización existentes actualmente en el mundo, de las cuales 686 son de destilación y el resto de membrana, principalmente de electrodiálisis. La producción total mundial de estas plantas es de unos 1.250 millones de m³/día.

Respecto a la influencia del tamaño de la planta sobre el coste unitario del agua dulce producida, las gráficas de Löf, de nuestro anterior trabajo, deben ser sustituidas por las de la figura 3, las cuales muestran el descenso del coste al aumentar el tamaño de la instalación. Las líneas de trazos corresponden a plantas de destilación de agua de mar, y las continuas se refieren a procesos de membrana. Para las de destilación se ha elegido como tipo la planta de 200.000 m³/día, mientras que para las de membrana el prototipo elegido es el de 40.000 m³/día, bien entendido que estas últimas han de trabajar con aguas mucho menos salinas que la de mar (unas 2.500 ppm).

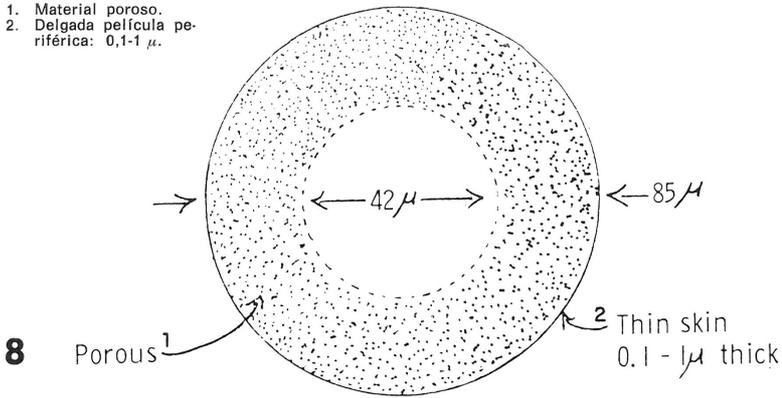
El desglose de costes (instalación, energía, mantenimiento, etc., puede verse muy detallado en el mencionado trabajo de Strobel (loc. cit.), pero, para fines de orientación, los diagramas de la figura 4 pueden servir de base. El círculo de la izquierda marca la distribución de gastos para una planta de destilación MSF de 4.000 m³/día, y el de la derecha corresponde a una instalación de 40.000 m³/día.

Como es lógico, el precio relativo de coste del agua producida será tanto menor cuanto mayor sea el factor de utilización de la planta. Este extremo se halla reflejado muy claramente en la gráfica de la figura 5. Puede observarse que con factores de 90 % el coste puede ser unas cinco veces menor que si la utilización de la planta es de solamente un 20 %.

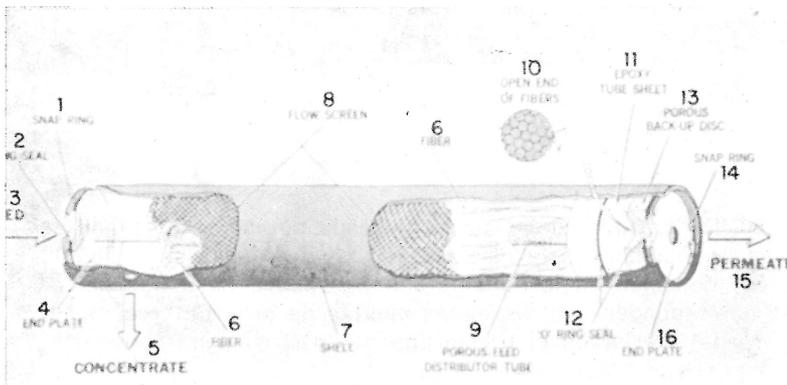
(1) J. J. Strobel: **Práctica de la desalinización**. Noyes Data Corp., New Jersey, pág. 152 (1973).

7

1. Material poroso.
2. Delgada película periférica: 0,1-1 μ .



1. Anillo de retención.—2. Anillo de sellado.—3. Alimentación.—4. Placa frontal.—5. Concentrado.—6. Fibra.—7. Cubierta.—8. Pantalla de flujo.—9. Tubo distribuidor poroso.—10. Extremo abierto de las fibras.—11. Hoja de resina epoxi.—12. Anillo de sellado.—13. Disco poroso trasero.—14. Retén elástico.—15. Salida de agua purificada.—16. Disco de cierre.



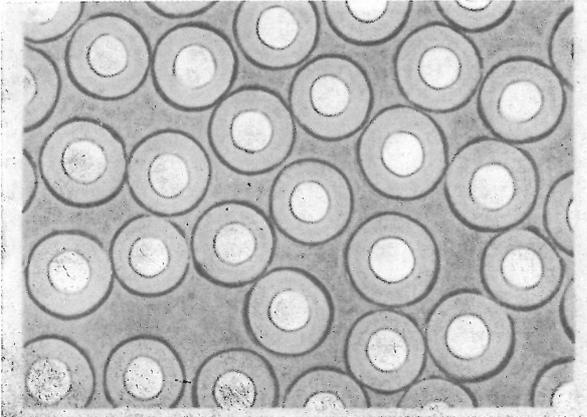
Para una apreciación más detallada de cómo se reparten los gastos y cómo inciden en el precio total de coste del agua puede servir el diagrama de la figura 6, basado en el funcionamiento de una planta de destilación de 8.800 m³/día trabajando al 90 % con una instalación MSF alimentada con agua de mar. Esta planta lleva más de seis años en funcionamiento.

Puesto que el Decreto a que hemos hecho alusión al comienzo de este trabajo prevé la instalación de plantas duales, agua-electricidad, debemos indicar que, en efecto, tal tipo de instalaciones ofrece indudables ventajas, especialmente en el aspecto económico y en lo que suponen para la regulación del abastecimiento. Un completo trabajo sobre esta cuestión es el de Shiozawa (1), del que tomamos estas notas.

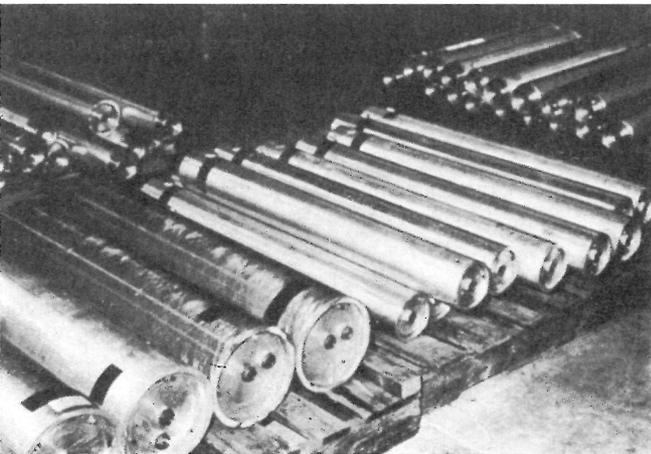
El sistema consiste, a grandes rasgos, en un generador nuclear de vapor, un sistema turbogenerador, una planta de evaporación y un embalse o depósito de regulación. La figura 7 muestra esto esquemáticamente. La curva al pie de la figura indica la evolución del abastecimiento de agua natural en función del tiempo. Obsérvense los cuatro picos inferiores, en los cuales el abastecimiento no puede seguir a la demanda. El agua potabilizada procedente de la planta esquematizada puede, evidentemente, «rellenar» estos huecos, al mismo tiempo que envía energía eléctrica a la red general.

(1) S. Shiozawa: **Estudio de una planta dual de tipo nuclear para el servicio de la región metropolitana de Nueva York.** Viena (Austria), abril 5-8 (1971).

9

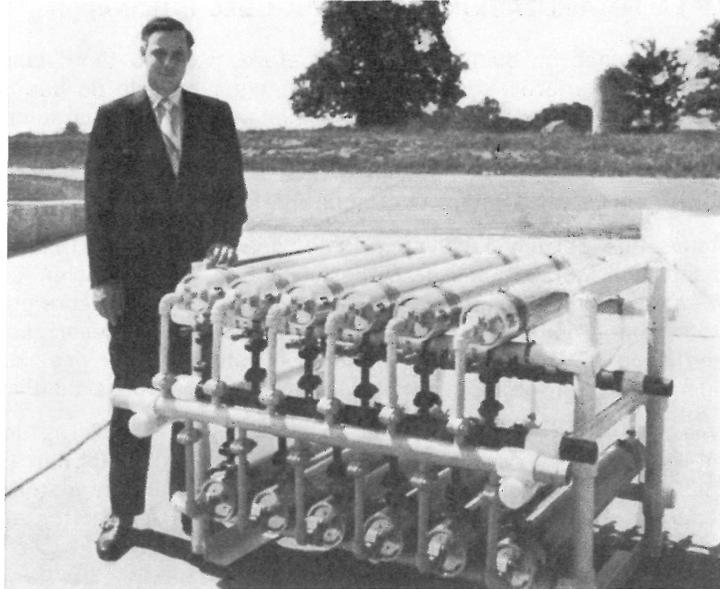


10



11

12

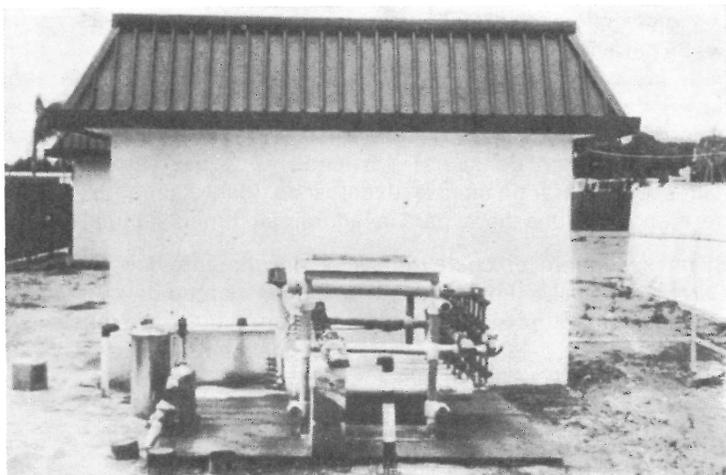


La instalación está basada en un reactor térmico capaz para 3.565 megavatios térmicos, de los cuales 594 megavatios eléctricos son enviados a la red de suministro. El vapor producido pasa a una planta de destilación de 1.000 m³/día, que, almacenados en el reservorio, se unen con los 5.600 m³/día de agua natural para mantener el suministro de unos 6.000 m³/día, que se supone es el consumo de la ciudad.

Una completa discusión sobre costes, localización, métodos, etc., pueden encontrarla nuestros lectores en el informe sobre plantas duales de la O.S.W. R&D Report, núm. 490. En el apéndice de este trabajo detallaremos el cálculo de costes de dos plantas potabilizadoras de agua de mar de tamaño medio (200 a 4.000 m³/día), con datos 1973 tomados de (1).

(1) W. J. Schwarz: **Noyes Data Corp.**, New Jersey, pág 168 (1973).

13



4. LA POTABILIZACION EN REGIONES DEL INTERIOR

España posee un buen desarrollo costero, pero no tanto como para que no existen extensas regiones interiores con problemas de agua potable de buena calidad, especialmente en cuanto se refiere a disponibilidades de manantiales de agua dulce apta para el consumo. Hay zonas en las que el agua, aunque relativamente abundante, resulta totalmente inadecuada para uso doméstico —aguas de pozo, depósitos subterráneos— y en las cuales resultaría totalmente absurdo pensar en potabilizar el agua marina.

Aguas que poseen 5.000 ppm (y en ocasiones hasta 10.000) pueden ser potabilizadas fácilmente con los sistemas de ósmosis inversa. Esta solución es mucho más económica que los sistemas de destilación y puede competir perfectamente con el transporte de agua dulce desde regiones distantes. El sistema de fibras huecas desarrollado por Du Pont y conocido como Permasep B-9, parece ir a la cabeza en esta clase de desarrollos. Otras alternativas a la fibra hueca incluyen las membranas planas, las membranas tubuladas y los sistemas en espiral.

Una fibra hueca B-9 (fig. 8) es un tubo (?) de 85 micras de diámetro exterior, con un hueco interior de 42 micras. La pared exterior es un delgado film (0,1 a 1,0 micras) de poliamida aromática. El resto del interior del tubo está formado por material poroso que ayuda a dar consistencia al conjunto de tal modo que al someter los tubitos a una presión externa de 28 kp/cm² no se colapsen, es decir, no se aplasten.

Obtenidos estos finos tubos (como un cabello humano), que constituyen el alma del sistema Permasep, más de un millón de éstos se introducen en un tubo de aluminio, o de epoxi con fibra de vidrio, tal como indica el diagrama de la figura 9. Un tubo de alimentación de salmuera entra por el centro de la masa de tubos capilares y distribuye ésta por la parte exterior de los mismos. El agua dulce va pasando al hueco de los capilares y sale por un extremo. Para que esto ocurra, una vez relleno el tubo exterior (que puede ser de 10 o de 20 cm de diámetro) se cementa con epoxi el extremo de los capilares y, con una fina herramienta, se da un corte para abrir los conductos interiores (de 42 micras), que es por donde va a salir el agua potable. El extremo de la masa de tubos, una vez efectuado el corte, queda como en la microfotografía de la figura 10.

Los grandes tubos de aluminio tienen una longitud de 1,2 m y son capaces de producir cada uno (el de 10 cm) una media de 13.000 litros de agua dulce por día. La salmuera concentrada sale al exterior por el orificio que se indica en la figura 9. La figura 11 muestra una colección de estos tubos, tanto de 10 como de 20 cm de diámetro. Ni que decir tiene que estos tubos pueden agruparse en batería formando unidades de producción.

En la figura 12 puede verse una unidad de 12 tubos de 10 cm que, ocupando un espacio de solamente 1,5 × 1,5 × 1,0 m, puede producir más de 90.000 litros/día de agua dulce. La puesta en paralelo de elementos Permasep no tiene prácticamente límite, de tal modo que una planta para 4.000 m³/día ocupa solamente una superficie de 12 × 18 m, en la cual se incluyen las instalaciones de bombeo, pretratamiento químico del agua de alimentación (cuando es necesario), filtros, etc. Una planta más pequeña, capaz para 100 m³/día, ocupa sólo 1,5 × 2,1 m.

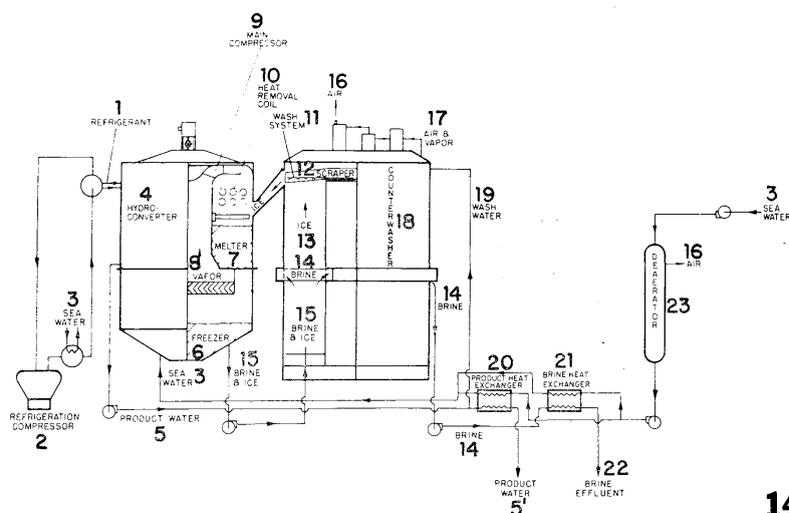
Los materiales auxiliares, aparte los tubos de ósmosis ya descritos, suelen ser de acero inoxidable para las aguas salinas, PVC para las aguas dulces y bronce, acero inoxidable y plásticos para las bombas, válvulas, etc. Con tubos Permasep de epoxi-fibra pueden trabajar con aguas de pH comprendido entre 4 y 11 sin el menor peligro de corrosión. En varios pueblos del Irán se están montando unidades Permasep de 112.000 litros diarios de agua de alta calidad (menos de 500 ppm de sales) partiendo de aguas salobres con más de 5.000 ppm (1). Estas unidades están prácticamente exentas de mantenimiento, siendo suficiente una inspección diaria de menos de una hora para asegurar su funcionamiento permanente.

Si no se cuenta el coste del agua de alimentación (salmuera), los investigadores Whitman y Caracciolo de Du Pont (2) indican unos gastos de primera inversión de 15 ptas./litro · día para plantas de 200 m³/día de capacidad, cifra que baja hasta 3,25 ptas./litro · día para instalaciones de 12.000 a 20.000 m³/día. Los gastos operacionales pueden ir desde 3,25 ptas./m³ hasta cerca de las 10 ptas., según los casos.

(1) Anónimo: «Ion», núm. 384, pág. 410 (1973).

(2) G. M. Whitman y V. P. Caracciolo: **Noyes Data Corp.**, New Jersey, pág. 226 (1973).

1. Refrigerante.
2. Compresor de refrigeración.
3. Agua marina.
4. Hidroconvertidor.
5. Agua pura.
6. Congelador.
7. Fundido.
8. Vapor.
9. Compresor principal.
10. Serpentin para separación de calor.
11. Sistema de lavado.
12. Rascador.
13. Hielo.
14. Salmuera.
15. Salmuera y hielo.
16. Aire.
17. Aire y vapor.
18. Lavado en contracorriente.
19. Agua de lavado.
20. Intercambiador (agua pura).
21. Intercambiador (salmuera).
22. Salida de salmuera.
23. Desgasificador.



14

Respecto a rendimiento de estas instalaciones, los datos obtenidos de una pequeña planta transportable (fig. 13) capaz de producir 100 m³/día de agua potable y que lleva unos tres años de funcionamiento ininterrumpido, se resumen en la tabla I.

TABLA I

CALIDAD DEL AGUA

COMPONENTES	Agua salobre	Agua potabilizada	USPHS
Calcio	312	10	73
Magnesio	141	12	40
Sodio y potasio	60	15	25
Bicarbonatos	183	37	67
Cloruros	96	59	67
Sulfatos	1.008	21	228
Hierro	0,05	00,0	0,001
Silice	24	4	8
Dureza	1.360	60	333
Dureza total	1.800	155	500

NOTA. Las cifras representan ppm; las indicadas USPHS se refieren a lo permitido por la legislación americana.

COSTES DE INSTALACION Y EXPLOTACION

Precio total de la planta	1.800.000 ptas.
Energía eléctrica	0,70 ptas./m ³
Productos químicos	1,24 ptas./m ³
Filtros	0,24 ptas./m ³
Mano de obra	1,56 ptas./m ³
Reemplazo tubos ósmosis	2,01 ptas./m ³
Amortización (6 %, 20 años)	3,90 ptas./m ³
Coste total del agua	9,80 ptas./m ³

En el trabajo mencionado de Whitman se incluye un estudio completo de una planta análoga, pero con capacidad para 400 m³/día, ampliable al doble en caso necesario. Estas plantas operan a un 67 % de rendimiento y están instaladas en Greefield, Iowa, que es una población de 2.300 habitantes. Los tubos de ósmosis vienen a durar unos cinco años, y el coste total de las instalaciones se aproxima a los 5,5 millones de pesetas.

Otras ventajas de las que no hemos hablado, que presentan las instalaciones de ósmosis inversa, es que, además de eliminar las sustancias inorgánicas mencionadas en la tabla I, las bacterias, virus y pirógenos que pudieran existir en el agua salobre de alimentación también quedan eliminados sustancialmente durante el proceso, sin que ello signifique que se obtiene un agua 100 % estéril.

Hay, por último, otro aspecto digno de destacarse en el empleo del sistema Permasep que estamos comentando. Los ensayos llevados a cabo por Du Pont, incluso en plantas comerciales, permiten decir que sustancias orgánicas tales como rafinosa, sacarosa, glucosa, sorbitol, arabinosa, glicerina, glicol etilénico, fenol, ácido acético, acetato sódico, ácido butírico y ácido benzoico, en concentraciones de hasta 2.000 ppm, también son eliminados en un 99 %. Esto abre un campo de aplicaciones insospechado en lo referente a la recuperación de aguas residuales de ciudad, que pueden, de este modo, ser reusadas por la comunidad, con el consiguiente alivio para el abastecimiento urbano.

Dado que el proceso B-9 requiere muy poca mano de obra, escasa vigilancia, mantenimiento exiguo y seguridad de funcionamiento, parece altamente recomendable para las aplicaciones indicadas (no para agua de mar); todo ello sin contar que su coste de primera instalación viene a ser de 1/3 del de una planta MSF de la misma capacidad. No es de extrañar entonces que los investigadores de Du Pont hayan ganado en 1971 el premio Kirkpatrick Chemical Engineering, concedido en U.S.A. al mejor desarrollo en este campo.

Respecto a la posibilidad de utilizar el sistema B-9 con aguas salinas de alta concentración (superior a 5.000 ppm), hay un buen ejemplo en el que, al parecer, el sistema está dando buen resultado. Nos referimos al Gran Bahamas Hotel, cuyo agua de suministro contiene 20.000 ppm. Una primera unidad B-9 rebaja esta concentración a 2.000 ppm en una sola etapa. Una segunda unidad trata este agua para llevarla a límites de absoluta potabilidad.

5. LAS PLANTAS DE CONGELACION

En nuestro anterior trabajo (loc. cit.) se mencionaban, en el apartado 3.4, las ventajas potenciales de las instalaciones de congelación que pueden trabajar tanto con agua de mar como con salmueras de salinidad más baja. Durante una visita de trabajo que tuvimos ocasión de realizar al puerto jordano de Aqaba, en el mar Rojo, con un reducido grupo de ingenieros y arquitectos españoles en contacto directo con el Gobierno hachemita, ya recomendamos a los elementos responsables jordanos que era absolutamente inútil pensar en una promoción turística de la zona si no se montaba una planta potabilizadora. Recuérdese que en dicha región las precipitaciones suelen ser de 1 litro/m² cada tres o cinco años. En suma, nulas.

A tiro de flecha de Aqaba se encuentra la bella población israelí de Eilat, al otro lado de la frontera, que **ya posee** una importante planta de congelación de 1.000 m³/día basada en el sistema VFVC, desarrollado por Weiss (1), y que responde al esquema de la figura 14. El agua de mar se bombea a la temperatura ambiente a través de un filtro para separar algas y otras impurezas y luego pasa a un desaierador de vacío para separar los gases disueltos. El agua marina desgasificada pasa a dos cambiadores de calor, donde se enfría por contacto indirecto con el agua potable (procedente de hielo) y la salmuera concentrada, que también se encuentra en el punto de congelación.

Este agua es, entonces, bombeada al congelador (recipiente de la izquierda). El agua de mar hierve en vacío (3,4 mm de Hg) y parte pasa a la forma de vapor. Para ello, se extrae calor del resto de la salmuera, si bien la parte principal del agua salada alcanza su punto de congelación, y por cada kilo de vapor formado se consiguen 7,5 kg de hielo. De un 30 a un 95 % del agua salada se convierte en hielo puro y en vapor. La salmuera, a su vez, se va concentrando hasta alcanzar de un 5 a un 7 % de sales (50.000-70.000 ppm). La papilla de cristales de hielo y salmuera pasa continuamente al separador (recipiente del centro del esquema), donde se efectúa la separación y lavado del hielo, que, por fusión ulterior, se convierte en agua dulce.

El vapor producido en el congelador se comprime hasta 4,8 mm de mercurio y se lleva hasta la cámara de fusión, donde «calienta» al hielo para convertirlo en agua. En el esquema de la

(1) P. A. Weiss: **Noyes Data Corp.**, New Jersey (1973).

figura 14 pueden verse los circuitos auxiliares, tales como compresor de refrigeración, bombas, cambiadores térmicos, etc.

Las características funcionales de la planta son tales que se consumen 11,2 kW/m³ de agua fresca. No se necesitan tratamientos químicos auxiliares, no existen problemas de corrosión (por trabajar a baja temperatura) y los materiales que entran en la construcción de los equipos son acero al carbono, aluminio y plásticos; en definitiva, materiales ordinarios.

6. APENDICE

Tal como indicábamos en 3, incluimos aquí las líneas generales de cómo se calculan la inversión y los costes de funcionamiento de una potabilizadora. Dos ejemplos nos servirán para ello.

6.1. Planta para la obtención de 380.000 litros/día de agua potable

Se trata de datos obtenidos principalmente de plantas de destilación, ocho efectos, localizadas en la zona del Caribe. Coste: 350.000 \$.

6.1.1. Costes fijos (planta de 100.000 galones = 380.000 litros/día):

Intereses y cargas de amortización:

$$350.000 \times 0,163 = 57.000 \text{ \$/año}$$

(factor de recuperación del capital, 10 años 10 % intereses).

$$\frac{57.000/\text{año}}{100.000 \times 365 \text{ días} \times 0,90} = 1,74 \text{ \$/1.000 gal}$$

(0,90, factor de utilización de la planta).

Tasas y cargas de seguros:

$$350.000 \times 0,03 = 10.500 \text{ \$/año}$$

$$\frac{10.500}{100.000 \times 365 \text{ días} \times 0,90} = 0,32 \text{ \$/1.000 gal}$$

Total de costes fijos:

$$1,74 + 0,32 = 2,06 \text{ \$/1.000 gal}$$

6.1.2. Costes operacionales:

Combustible (a 0,20 \$/gal USA).

Vapor de proceso:

$$\frac{1.000 \text{ gal} \times 8,33 \text{ lb/gal}}{6,5 \text{ lb/1.000 Btu}} = 1.280 \times 10^6 \text{ Btu/1.000 gal agua.}$$

Vapor del eyector:

$$\frac{215 \text{ lb}}{\text{h}} \times \frac{1.100 \text{ Btu}}{\text{lb}} = 237.000 \text{ Btu/h}$$

$$\frac{237.000 \text{ Btu}}{\text{h}} \times \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} \times \frac{\text{día}}{100.000 \text{ gal}} = \frac{57.000 \text{ Btu}}{1.000 \text{ gal agua}}$$

Calor total requerido:

$$\begin{array}{r} 1,28 \times 10^6 \text{ Btu/h} \\ 0,06 \times 10^6 \text{ Btu/h} \\ \hline 1,34 \times 10^6 \text{ Btu/h} \end{array}$$

$$\frac{1,34 \times 10^6 \text{ Btu}/1.000 \text{ gal agua}}{135 \times 10^3 \text{ Btu}/\text{gal fuel} \times 0,82} = 12,1 \text{ gal fuel}/1.000 \text{ gal agua}$$

(135×10^3 = poder calorífico del fuel; 0,82 = rendimiento de caldera).
(Suponemos 12,5/1.000 gal agua = pérdidas de combustible).

Coste total del combustible:

$$\frac{12,5 \text{ gal fuel} \times 0,20 \text{ \$/gal}}{1.000 \text{ gal agua}} = 2,50 \text{ \$/1.000 gal agua.}$$

Costes de energía:

Caldera	5 kW
Bomba agua marina	15 kW
Planta HTME	18 kW
Alumbrado y varios	3 kW
Potencia total ...	41 kW

(Planta HTME, consumo de la planta de tubos destiladores horizontales, múltiple efecto; datos del fabricante).

$$\frac{41 \text{ kW} \times 0,03 \text{ \$/kWh} \times 24 \text{ h}}{100.000 \text{ gal}/24 \text{ h}} = 0,30 \text{ \$/1.000 gal agua.}$$

Costes de mantenimiento, mano de obra y materiales:

$$\frac{200.000 \text{ \$} \times 0,04}{365 \text{ días} \times 100.000 \text{ gal}/\text{día} \times 0,90} = 0,25 \text{ \$/1.000 gal}$$

(200.000 \$ = valor estimado; 0,04 = 4 % cargado sobre coste equipo).

Mano de obra:

$$\frac{40 \text{ \$/día} \times 365 \text{ días}}{365 \text{ días} \times 100.000 \text{ gal} \times 0,90} = 0,45 \text{ \$/1.000 gal}$$

(40 \$ = valor estimado; 0,90 = factor de utilización).

Coste de productos químicos:

Aproximadamente, 0,10 \$/1.000 gal.

6.1.3. Valor total de la producción (resumen):

Cargas fijas	2,06	\\$/1.000 gal
Coste de combustible	2,50	»
Energía eléctrica	0,30	»
Mantenimiento	0,25	»
Mano de obra	0,45	»
Productos químicos	0,10	»
Coste total	5,66	\\$/1.000 gal

Esto viene a equivaler a un coste total de 89,5 ptas./m³.

6.2. Planta para la obtención de 1.900.000 litros/día de agua potable

Las condiciones de emplazamiento (área subdesarrollada) y financieras, se supone que son las mismas del ejemplo anterior. El coste total de la planta instalada es de 500.000 \$ + 200.000 \$ de elementos auxiliares = 700.000 \$.

Mediante un razonamiento similar al utilizado en el ejemplo 6.1, se llega a una distribución de costes totales cuyo desglose es:

Cargas fijas	0,83	\$/1.000 gal
Combustible	2,50	»
Energía eléctrica	0,16	»
Mantenimiento	0,06	»
Mano de obra	0,22	»
Productos químicos	0,10	»
Coste total	3,87	\$/1.000 gal

Esto viene a equivaler a un coste total de 61 ptas./m³.

Los dos ejemplos que acabamos de detallar (tomados de William J. Schwarz, Jr., de la Universal Desalting Corp.) muestran, en forma orientativa, cómo influyen los distintos parámetros en la cifra total de coste del metro cúbico de agua potable a partir de agua de mar. No autorizan, sin embargo, a que pueda darse una respuesta concreta a la importante pregunta: ¿Cuánto cuesta el metro cúbico de agua?

Son muchos y variados los factores que influyen en el establecimiento de dicho coste, entre los que cabe señalar: lugar de emplazamiento de la planta, precio de los terrenos para la instalación de la misma, precio del combustible, coste de la energía eléctrica, facilidades para el aprovechamiento de los vapores residuales, posibilidad de alargar los plazos de amortización y mil y una más cuestiones que, de un modo u otro, han de influir en el precio final.

7. BIBLIOGRAFIA

Aun cuando parece que en los últimos tiempos la aportación de trabajos que tratan del tema presente se ha hecho un poco inferior a la experimentada al comienzo de la década de los 70, queremos hacer constar —aparte de los trabajos mencionados en el texto— algunos títulos que, en nuestra opinión, pueden resultar interesantes a los lectores:

- 7.1. «La desalación y su situación en España»; por F. Oltra y F. Troyano: Esta obra ha sido promovida por la Comisión Interministerial de Desalación y publicada por la Junta de Energía Nuclear en 1972. Contiene una muy completa relación de plantas potabilizadoras en el mundo, cerrada a comienzos de 1967.
- 7.2. «La sed del mundo»; por Cyril Gomella: Obra traducida del francés por Editorial Labor y publicada en 1973. También da una relación de las principales estaciones de desalación en servicio y una colección de referencias bibliográficas que abarca 87 citas.
- 7.3. «Aplicación de la energía nuclear a la desalación del agua»; por J. A. Cerrolaza y V. Almagro: Breve artículo publicado en la revista «Química e Industria», diciembre de 1973.
- 7.3. «Ultrafiltración y ósmosis inversa»; por E. G. Atkins: Opúsculo editado por la Oficina para el Extranjero de la Oficina Central de Información de Londres en 1976. Una puesta al día elemental sobre la técnica en cuestión.
- 7.4. «Equipos para la limpieza de aguas residuales»; por C. Pazar, 1971: Lo más completo editado hasta la fecha por Noyes Data Corp., de New Jersey, U.S.A., con más de 500 páginas y numerosas ilustraciones y diagramas. Contiene las señas de las compañías americanas más importantes dedicadas a estas cuestiones.

résumé

Potabilité-76

J. M. Tobío, professeur de recherche

Dans ce travail, qui est la suite d'un autre travail publié par l'auteur, sont énumérées les particularités les plus intéressantes dans le domaine de la potabilité, avec une brève bibliographie arrêtée au début de 1976. L'auteur commente le Décret 926/1973 qui réglemente en Espagne le financement des stations d'eau potable et cite les caractéristiques les plus saillantes des stations doubles (eau et énergie), l'osmose inverse et la congélation, pour terminer par un appendice consacré au calcul élémentaire de ce type d'installations tant en ce qui concerne les coûts de première installation que les frais d'exploitation et d'entretien.

summary

Water Purification-76

J. M. Tobío, Research Professor

In this paper, that is a continuation of a previously published one, are listed the most interesting particulars in the field of water purification, with a short bibliography which ends in the beginning of 1976. The paper comments Decree 926/1973 which in our country regulates the financing of the purification plants and mentions the most outstanding characteristics of the dual purpose plants (water and energy), inverse osmosis, and freezing. Finally, the paper contains an appendix dedicated to elementary calculation of this type of installations, both with regard to the expenses of the installation as well as operation and maintenance costs.

zusammenfassung

Wasserreinigung-76

J. M. Tobío, Forschungsprofessor

In dieser Arbeit, die die Fortsetzung einer veröffentlichten ist, werden die bedeutendsten Einzelheiten in Bezug auf Wasserreinigung, mit einer kurzen Bibliographie, die Anfang 1976 endet, aufgezählt. Die Arbeit kommentiert Verordnung 926/1973, die in Spanien das Finanzieren der Wasserreinigungsanlagen regelt und es werden die Eigenschaften der Doppelreinigungsanlagen erwähnt (Wasser und Energie), sowie auch umgekehrte Osmosis und Gefrieren. Zum Schluss folgt ein der elementaren Berechnung von Anlagen dieser Art gewidmeter Appendix, sowohl in Bezug auf die Kosten des Einrichtens als auch die Betriebs- und Unterhaltungskosten.

publicaciones del i. e. t. c. c.

Estructuras Ligeras de Acero

Versión española de
**LIGHT GAGE COLD-FORMED
STEEL DESIGN MANUAL**

Traducción de FRANCISCO GIL,
Alumno de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

Bajo la supervisión de JUAN BATANERO,
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Estas estructuras, constituidas a base de perfiles de chapa fina, no pueden ser tratadas según las reglas clásicas de cálculo, dado que presentan una gran sensibilidad a los fenómenos de inestabilidad elástica, lo cual influye en los procedimientos de cálculo y comprobación que les son aplicables.

El manual que el I.E.T.c.c. presenta en versión española autorizada por el American Iron and Steel Institute, es la mejor guía conocida para quien quiera iniciarse en la aplicación de los citados perfiles. Contiene, además de la norma americana para el proyecto de estructuras ligeras, unos amplios comentarios redactados por el Prof. G. Winter, experto especialista sobre estos temas, así como tablas y ejemplos de aplicación que aclaran el articulado de la norma.

La traducción española se ha acomodado a los materiales, a las normas españolas y a las unidades métricas, en todos aquellos capítulos y tablas que lo exigían. Las tablas han sido recalculadas con la ayuda del calculador electrónico del I.E.T.c.c., añadiéndose, asimismo, numerosas notas de pie de página.

El manual se compone de:

- 1.ª parte: «Normas para el cálculo de estructuras ligeras de acero».
- 2.ª parte: «Información suplementaria».
- 3.ª parte: «Ejemplos ilustrativos».
- 4.ª parte: «Gráficos y tablas de características mecánicas y resistentes».

La utilidad de este manual ha sido universalmente reconocida y existen versiones en lenguas francesa y alemana.

Un volumen encuadernado en tela, de 16,5 × 23,5 cm, compuesto de 266 págs. Madrid, 1969
Precios: España, 450 ptas.; extranjero, \$ 9.