

ANALES DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ
CATEDRÁTICO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

LECCIÓN INAUGURAL DEL CURSO 1963-64



VOL. XXXVII - CURSO 1963-64
CUADERNO I - CIENCIAS

ANALES DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA

Edita el Secretariado de Publicaciones, Intercambio Científico y Extensión Universitaria.

Aparece cada curso un volumen que comprende fascículos correspondientes a las distintas Facultades.

DIRECCIÓN:

Magnífico y Excmo. Sr. Rector de la Universidad.
Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Filosofía y Letras.
Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Ciencias.
Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Derecho.
Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Medicina.

CONSEJO DE REDACCIÓN:

ILMO. SR. PROF. JOSÉ SANTA CRUZ TELJEIRO, Director del Secretariado.
DON FRANCISCO JOSÉ LEÓN TELLO, Secretario.

VOCALES:

PROF. ANTONIO LLOMBART RODRÍGUEZ, de la Facultad de Medicina.
PROF. ADOLFO MIAJA DE LA MUELA, de la Facultad de Derecho.
PROF. MIGUEL TARRADELL MATEU, de la Facultad de Filosofía y Letras.
PROF. AGUSTÍN ESCARDINO BENLLOCH, de la Facultad de Ciencias.

Dirección para canje y obtención de publicaciones: SECRETARIADO
DE PUBLICACIONES, INTERCAMBIO CIENTÍFICO Y EXTENSIÓN UNIVERSITARIA.
Universidad de VALENCIA.
(España)

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

EXCELENTÍSIMO SEÑOR MINISTRO
MAGNÍFICO Y EXCELENTÍSIMO SEÑOR RECTOR,
EXCELENTÍSIMOS E ILUSTRÍSIMOS SEÑORES,
COMPAÑEROS DE CLAUSTRO Y ALUMNOS DE LAS CUATRO FACULTADES,
SEÑORAS Y SEÑORES:

*Had I the heavens embroidered cloths,
Enwrought with golden and silver light,
The blue and the dim, and the dark cloths
Of night and lighth and the half lighth,
I would spread the cloths under your feet:
But I, being poor, have only my dreams;
I have spread my dreams under your feet;
Tread softly because you tread on my dreams*

W. B. YEATS

La Universidad por ley y por costumbre, rodea este acto de solemnidad inusitada, hoy elevada a un máximo al celebrarse bajo la presidencia del señor Ministro de Educación que nos honra, nos satisface y estimula. La Universidad quiere recibir a todos los que han acudido deferentes a su invitación con todos los honores que merecen, obligada por su gloriosa tradición y designa a uno de sus Profesores para que después de ofrecer a todos el testimonio de su agradecimiento pronuncie la lección inaugural del curso que se inicia. Hacerlo es para mí un gran honor, que desempeño con íntima satisfacción y alegría y a la par sin vanidad y con temor.

No os extrañará que habiéndome formado en esta Universidad, tan llena para mí de entrañables recuerdos, dedique con mis primeras palabras un fervoroso recuerdo de gratitud a todos los que fueron mis maestros y con su ejemplo de humanas virtudes, cultivaron en mí una vocación ya arraigada en mi ambiente familiar.

Confío en que la dignidad y la fuerza de la misión de la Universidad, en que en noble fuego que alienta en el corazón de la misma, dignifique, fortalezca e ilumine mis palabras con destellos tales que impidan que se aprecien sus defectos y hagan lógica su natural palidez.

Requiere una tradicional costumbre que en esta ocasión se publiquen las modificaciones experimentadas por el Claustro durante el anterior curso académico. Brevemente daré cuenta de ellas.

El 28 de Septiembre de 1962 cesó por jubilación forzosa, al haber cumplido la edad reglamentaria, el Catedrático de Derecho Mercantil D. Alvaro Calvo Alfageme y el 30 de Enero de 1963, por análoga causa cesó D. Carlos Sanz Cid, Catedrático de Derecho Político.

El 30 de Septiembre de 1962 le fue concedida la excedencia voluntaria, a instancia propia, al Catedrático de Derecho Penal D. Antonio Ferrer Sama. También perdió la Facultad de Derecho la colaboración de D. Ramón Trías Fargas, Catedrático de Economía Política y Hacienda, al serle concedida la excedencia activa.

Nuestra Universidad siente la pérdida de estos grandes maestros, que por diversas circunstancias, siempre lamentadas, han cesado en la noble tarea del quehacer universitario en que tan gran honor es tomar parte activa y en el que toda colaboración es preciosa. La cultura vasta y profunda de estos Profesores, que todos admiramos, quedó plasmada en una labor docente de la que tan gratos recuerdos quedan entre nosotros.

La Facultad de Filosofía y Letras vio separarse de su Profesorado al Profesor Adjunto D. Sabino Alonso Fueyo, por haber sido nombrado Director del periódico Arriba. Aunque sea a costa de un sacrificio, es motivo de satisfacción para nuestro Claustro que Profesores a él pertenecientes alcancen puestos destacados como prueba de la consideración y estima que merecen.

También cesó por un año el Profesor Adjunto de la misma Facultad D. Ricardo Marín Ibáñez, por haber sido nombrado por el Gobierno de Honduras y el Director General de la Unesco, Asesor en materia de formación del profesorado en el cuadro de asistencia técnica. Todos deseamos que tras el indudable éxito de su misión se reincorpore en fecha próxima a Nuestra Universidad.

Como contrapartida a las bajas que ha experimentado nuestro Claustro tenemos que registrar con satisfacción la incorporación al mismo de dos nuevos Catedráticos: D. José María Navarrete y Urieta, Catedrático de Derecho Penal, procedente de la Universidad Compostelana, que llega a la nuestra por

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

concurso de méritos y D. Víctor Smith Ágreda, que tras brillantes oposiciones obtuvo la Cátedra 1.^a de Anatomía descriptiva y topográfica y Técnica anatómica de la Facultad de Medicina.

Al reiterarles públicamente la más cordial bienvenida, expresamos el deseo y la esperanza de que sus enseñanzas se desarrollen fructíferamente en nuestro ambiente universitario de acuerdo con su brillante historial académico.

También las bajas sufridas en el Profesorado Adjunto han tenido su compensación con la incorporación al mismo de tres nuevos Profesores. D.^a Teresa Puente Muñoz, adscrita a la 2.^a Cátedra de Derecho Civil; D. Juan Pérez Burriel, que por segunda vez ha ganada la Adjuntía de Derecho Administrativo y D. José María Rosselló Verger, nombrado por concurso-oposición, como los antes mencionados, para desempeñar la plaza de Profesor Adjunto de Geografía. Hacemos votos porque las dotes de inteligencia y laboriosidad de estos Profesores les conduzcan hasta los más altos puestos de la docencia universitaria.

El tema escogido para esta lección inaugural:

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

tiene gran importancia presente y futura. Ya en el Discurso pronunciado por D. Juan Antonio Suances en la clausura de las sesiones plenarias del Patronato Juan de la Cierva (1962), se subrayaba éste como el primero entre los problemas que actualmente producen mayor preocupación en dicho Patronato, por lo que se le está prestando gran atención, ya que "el problema es en España tan fundamentalmente distinto al de cualquier otra parte del mundo que es posible que su resolución nos afecte cuando a otros aun no haya empezado a preocuparles". De aquí que el Patronato conjuntamente con el Instituto Nacional de Industria, a través de la Comisión Nacional de Energías especiales, venga realizando una intensa labor particularmente en torno al aprovechamiento de la energía solar, con una instalación experimental en Las Rozas, en la que se ensayan de forma sistemática distintos tipos de destiladores. También el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, de dicho Patronato realiza experiencias, recogidas en una monografía de J. Laor-

den y J. M.^a Tobío, sobre "Potabilización del agua de mar" (1960) y el Centro Experimental del Frío ha iniciado también trabajos con el mismo fin.

Esta lección inaugural tiene como finalidad primordial exponer de forma sucinta y en lo posible alejada de tecnicismos, los caracteres generales del problema, su estado actual, y las posibles previsiones acerca de su evolución.

No ocultaré que mi mayor anhelo sería conseguir que quedase grabado en el ánimo de todos y particularmente en el de nuestros alumnos, en el de los que hoy llegan ilusionados hasta las puertas de nuestra Universidad y en el de los que se alejan de nuestras aulas, con una formación a la que hemos contribuido con lo mejor de nuestros esfuerzos, el ejemplo dado por la pléyade de hombres que se enfrentan con el problema enunciado, tratando de alcanzar al resolverlo una perfección tal que supera ampliamente a todo lo que pudiera considerarse preocupación utilitaria, dando a su labor características en las que "se acumula una tradición mantenida viva por el orgullo individual, exacta por la opinión profesional y que como las más altas manifestaciones artísticas se espolea y mantiene gracias a una crítica que discierne sus méritos" (Conrad).

Este trabajo de los científicos y técnicos tiene como fin el tender un puente—humanísimo puente—entre dos polos perfectamente definidos. El primero el hombre, que se enfrenta con sus necesidades. El segundo la Naturaleza, que ofrece sus recursos con ciertas limitaciones y condiciones.

La mayor dificultad del problema que nos ocupa es que se encuentra íntimamente ligado con el de la producción de alimentos y bienes de consumo y ha de considerarse como un problema vital que hay que resolver respetando todo lo que de noble existe en el hombre. Y como estableció el Profesor A. J. Toynbee en el Congreso Mundial sobre Alimentación, celebrado en Washington el pasado mes de junio, precisamente el respeto a la naturaleza humana constituye el máximo problema en la lucha por la supervivencia (1).

(1) Chem. and Eng. News, 10 de Junio de 1963. Editorial.

Í N D I C E

	<u>Págs.</u>
I. El problema de la escasez de agua dulce	15
II. Cantidad de agua necesaria	23
III. Calidad de las aguas dulces	31
IV. Aprovechamiento de los recursos de agua	37
V. Las aguas salinas	43
VI. Desalar	53
VII. Métodos de desalado	59
VIII. Economía de los procesos de desalado	65
IX. Química del mar	71
X. Métodos de destilación	79
XI. Destilación solar	91
XII. Congelación	97
XIII. Cristalización de hidratos	103
XIV. Procesos que usan membranas	109
XV. Simbiosis de procedimientos	121

EL PROBLEMA DE LA ESCASEZ DE AGUA DULCE

Aun cuando es más fácil y quizás mucho mejor, no empezar en absoluto, si a pesar de todo se ha de empezar, es en ese momento cuando se necesita más cuidado. Todo está implícito en el génesis.

H. M. TOMLINSON, "El Mar y la Selva"

Pocos són los factores que han influído tan poderosamente sobre la historia de la civilización como la perenne búsqueda del agua dulce por el hombre. En todos los tiempos y en todas las circunstancias, el disponer de ella ha sido siempre un problema de supervivencia. El agua es absolutamente indispensable: todos los procesos químicos vitales presuponen su presencia. El hambre puede soportarse en caso de necesidad durante treinta días; la sed, solamente tres.

Pero aparte de esta satisfacción directa de la sed, el agua es también absolutamente indispensable en los hogares, en la industria y en la agricultura. Para quien está acostumbrado a obtenerla en la cantidad que necesita sin más que accionar un grifo, es posible que no se perfile aparentemente ningún problema de agua. El hábito ha hecho que algo que es casi milagroso nos parezca normal. Pero hay un milagro que se repite constantemente desde el momento en que el calor del sol produce las nubes a partir del mar, nubes que el viento arrastra hasta la tierra, sobre la que dejarán caer benéfica lluvia que una cuidadosa organización técnica, a través de verdaderas obras maestras, conducirá hasta las manos del tal vez desprecupado consumidor.

Pero en esta distribución de las lluvias sobre los continentes la irregularidad es tan manifiesta, que de cada siete kilómetros cuadrados uno es desierto; y en nuestra propia patria, de los veinte millones de hectáreas que en números redondos constituyen su superficie agrícola, más de dieciocho

son tierras de secano. Y el secano afecta no sólo a la agricultura, sino también a la instalación de industrias y a la densidad de población.

Por ello el problema de la escasez de agua tiene, para el que lo ha vivido de cerca, resonancias profundas que pueden ser entrañables.

Oriundo de los Monegros, tierras áridas, enormes secanos en los que a pocos metros de profundidad bajo las capas de salagón, existen abundantes yacimientos de aguas salobres, viví desde muy pronto el planteamiento del problema que constituye el tema de esta lección inaugural.

Es notable que en el mismo centro de los Monegros, Bujaraloz, viese la luz un cosmógrafo insigne, Martín Cortés de Albarcar, que como todas las gentes acostumbradas a ver en la lluvia, o en el agua, un precioso don de la Providencia, fue un enamorado del mar. Y así dio a la imprenta en 1551 el libro titulado *Breve Tratado de la Esphera y del Arte de Navegar* que escribiera en 1545 y alcanzara resonancia internacional. Con palabras de mi hermano Antonio, *...paradoja parece que las tierras ásperas y secas de los Monegros, milenariamente vueltas al cielo en espera de las gotas de agua que fecunden sus entrañas, dieran a luz un cosmógrafo singular. Pero no lo es, porque Bujaraloz al fin y al cabo es una isla en un mar de tierras pardas y de luz cegadora, desde la que puede alcanzarse toda la bóveda celeste, guía y esperanza de los hombres del mar y de los campesinos que aran la tierra. Dice Martín Cortés: "Para caminar por el mar es necesario poner los ojos en el cielo". Aquí encontramos esa conjunción de cielo y de suelo, entre los cuales el sudor de nuestros tenaces hombres es capaz de vivificar los ocultos jugos que nutren la vida de las espigas de trigo, las que darán un pan recio como los terrones que criaron el grano, tierno como la verde planta recién nacida y salado como el sudor de las frentes que supo fecundar las semillas.* (I-1).

Ved aquí mezclados la aridez-el mar-el salado sudor, trinomio que tan reiteradamente habremos de estudiar en esta lección.

Y si hubiese de seguir buscando motivos hondos de mi sensibilidad frente a este problema de la búsqueda del agua, habría de hacer vivir ante vuestra imaginación las circunstancias de otras islas, esta vez de tierra entre aguas maravillosas y auténticas, en las que discurrió buena parte de mi actividad universitaria, que son tan bellas que desde los tiempos más antiguos recibieron los nombres más halagadores: Los fenicios las denominaron Islas Elíseas, los griegos las consideraron el Jardín de las Hespérides, para los romanos fueron las Islas Afortunadas, para los árabes "Kaledat". En estas entrañables Islas Canarias se aprecia como en ningún otro lugar la importancia del agua, porque son tierras de contrastes tremendos, en las que hay un norte en que existe el agua, de cegadora luminosidad y colorido que nuestra añoranza tiñe de cierta sutil melancolía, donde surge impresionante

una vegetación exuberante; y un sur seco, desértico, erizado de lava y de euforbias venenosas, cuya ardiente sequedad mueve al hombre a apreciar el poder y la majestad de la tierra. Y en torno a ellas el mar.

Y del contraste nace la afanosa búsqueda del agua entre las complicadas entrañas de una tierra incesantemente conmovida por los volcanes. Y cuando se encuentra, no sorprende el cuidado amoroso con que se distribuye un bien precioso tan duramente conseguido.

En las islas en que todo es *sur*, surgen los ingeniosos sistemas de lucha contra la aridez de Fuerteventura y Lanzarote; las gavias, jables y enarenados, que dan origen a las curiosísimas comunidades de regantes de arena.

Mas me parece ocioso detenerme en detalles para hacer comprender la importancia del agua ante un auditorio que con sus propios ojos ve cada día, en esta hermosa tierra valenciana, el contraste perenne entre las tierras secas y la ubérrima huerta, y que sin duda alguna ha venido a contraer una deuda de gratitud frente a pueblos de otras épocas, que por su procedencia conocían muy bien el valor del agua fecundadora.

El problema de la sed, de la aridez y de la escasez de agua, es un problema apasionante, porque como veremos se está alzando como un amenazador espectro, incluso sobre aquellas regiones de la Tierra en que las lluvias abundan, a consecuencia de un aumento incesante del consumo, debido al constante incremento de la población, al insospechado desarrollo industrial y al rápido crecimiento del nivel de vida.

Y es notable que en muchas ocasiones y como por ironía, muy cerca de los terrenos o de las ciudades sedientas existan aguas, bien del mar, bien aguas salobres, inadecuadas para su utilización por el hombre. La salinidad y la aridez se dan muchas veces la mano. Saint Exupery lo sabía muy bien cuando se dirige al agua para decirle: *Eres la mayor riqueza que hay en el mundo, la más delicada, tan pura en el vientre de la Tierra. Se puede morir de sed sobre una fuente de aguas salobres, se puede morir de sed a dos pasos de un lago de aguas saladas. Se puede morir de sed, y pudiera parecer paradoja, en medio del mar.*

Por ello cuando habla de la vida en el desierto nos dice: *hemos aceptado las reglas del juego: el juego nos ha formado a su propia imagen. El desierto se presenta en nosotros mismos. Abordarlo no es visitar el oasis, es hacer nuestra religión de una fuente* (1-2). La aridez externa nos oprime, nos conforma de tal suerte que sentimos la aridez en nuestra propia alma, y esta sensación nos hace buscar con unción religiosa una fuente.

Porque como se narra en los Cantos de los oasis del Hoggar (1-3), *es preciso estar en el desierto, oh Dassina, para conocer el silencio de la noche. Diríase que cae de la lámpara de cada estrella y del blanco sepulcro de la luna. El pecho de la arena no deja sentir un solo latido y duerme como el*

pecho de una mujer muerta a la que ninguna caricia puede despertar. Hay que estar perdido en el desierto, oh Dassina, para saber lo que es la soledad, donde no cantan ni un árbol ni un pájaro entre la aridez de las piedras o de la arena. El que desconoce todo esto no puede afirmar que ha estado nunca solo.

Por ello cuando sobre el porvenir de la Humanidad proyecta su sombra el peligro de la sed —la sed con sus manos de ardiente ceniza— el problema de la escasez del agua, para muchas zonas de la Tierra viejo como ella misma, alcanza una vigencia insoslayable.

Ya hemos dicho cómo en nuestro país, a pesar de todos los esfuerzos realizados, los regadíos no alcanzan aún la extensión de dos millones de hectáreas, y sería importante conocer cuántas ciudades no pueden ser sede de industrias que exijan consumo de grandes cantidades de agua. Los secanos españoles se caracterizan por las escasas precipitaciones, la irregularidad de las mismas y las grandes diferencias de temperaturas en las distintas épocas del año; con independencia de la mayor o menor fertilidad de nuestros suelos, nuestros secanos tienen que soportar las adversas condiciones del clima centradas en torno a la escasez de lluvias y a su irregular distribución.

Y en otras latitudes y naciones se reitera el problema, que es de tales dimensiones, que no debe sorprendernos que para resolverlo sea necesaria la colaboración de las más diversas ramas del saber; incluso de las que a primera vista pudieran parecer más alejadas en torno al frondoso árbol de la Ciencia.

Como se hace resaltar en “Sciences et Avenir” (1-4), la recuperación de las tierras áridas es un arduo problema que exige conocimientos de hidrología, ecología, climatología, micropaleontología, estudio de nuevas fuentes de energías, conversión de aguas salinas, e incluso el conocimiento de la Historia y de la Arqueología (1-5). La Historia y la Arqueología pueden ayudarnos extraordinariamente al darnos, no simplemente una noticia de las civilizaciones que existieron, sino ayudándonos a comprenderlas, explicándonos las causas de su desaparición y sobre todo transmitiéndonos el tesoro incalculable de la experiencia adquirida por el hombre en su lucha milenaria contra la aridez.

Y así resulta sumamente aleccionador que, dentro del cuadro algo decepcionante de lo que hasta ahora se ha logrado en torno a la rehabilitación de las tierras áridas para el cultivo, una de las pocas experiencias alentadoras sea la que se ha realizado en Israel, aplicando precisamente los conocimientos que los estudios históricos y arqueológicos han proporcionado.

La Historia nos enseña que hace más de 2000 años el Neguev era una región fértil, poblada por los nabaetanos, pueblo industrial y agrícola que fue capaz de regular las aguas del Neguev; desierto en que no es raro que

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

se pasen once meses del año sin caer una gota de lluvia, para recibir después en cuestión de un par de horas hasta cincuenta milímetros. Construyeron uno de los sistemas de irrigación más perfectos entre los que jamás hayan sido conocidos y lograron cosechas ubérrimas: 8 simientes de trigo, 7 de cebada. Los azares de la Historia hicieron que el Neguev quedase durante más de doce siglos convertido en auténtico desierto. El restablecimiento del sistema de irrigación descubierto por los arqueólogos, ha permitido a Israel llegar a duplicar la extensión de sus terrenos cultivados, en una experiencia que puede ser de mucha significación en el porvenir de la Humanidad.

Pero con toda la importancia de la escasez de agua dulce en las zonas áridas, y de la rehabilitación de éstas, es lo cierto que la penuria de agua ni se limita a los problemas agrícolas ni queda delimitada en torno a las zonas áridas. Es mucho más agudo y acuciante, y se está presentando ya en países situados en las zonas húmedas y dotados de mayor potencial económico, técnico e industrial.

Hace unos meses tuvo lugar en Berlín occidental el "Congreso Internacional del Agua", en el que se puso bien de relieve el problema de la insuficiencia o inadecuación de las disponibilidades de agua en un país tal como Alemania, que goza de precipitaciones de agua y nieve en cantidades que pueden considerarse excelentes y aun pródigas, y que dispone de una red hidrográfica en la que abundan los ríos caudalosos y de gran regularidad.

La impresionante y gigantesca industrialización, ligada al incremento de población y al consumo creciente de agua *per capita*, a la que se une la polución de las aguas causada por el lógico enclave de las grandes ciudades e industrias en las riberas de los ríos, está causando un problema extraordinario de enrarecimiento de las reservas de agua disponibles; el mismo Rin, a su paso por Colonia, se presenta ya profundamente contaminado.

Y en países tan ricos en recursos naturales como los Estados Unidos, se ha llegado a la conclusión de que el 40% de las grandes ciudades, son ya actualmente inadecuadas para el emplazamiento de industrias que sean consumidoras de grandes cantidades de agua, habiendo establecido además el "Bureau of Census" (1-6) que en el año 2000 el 30% de su población vivirá en las regiones áridas del Oeste donde, por ejemplo, ya en la actualidad, el dotar de agua suficiente a la ciudad de Los Angeles es un verdadero rompecabezas.

El consumo de agua por la industria puede llegar a ser extraordinariamente elevado. Se cita como ejemplo significativo, el que tres refinerías de petróleo de la ciudad de Hamburgo consuman más agua que los 1,6 millones de habitantes de dicha ciudad Hanseática (1-7).

Nó es por ello sorprendente que el problema del suministro de agua dulce en cantidad suficiente haya pasado a ser un problema de enorme envergadura.

En los Estados Unidos se considera como el problema nacional número uno. Desde 1952 en que fue aprobada por el Congreso de dicha nación la Saline Water Act, los créditos aplicados a la investigación de los procesos de obtención de agua dulce han ido creciendo a ritmo acelerado. Fue creado el Office of Saline Water (OSW), cuyos "Annual Reports" y publicaciones acerca de los trabajos realizados bajo contrato por las más diversas instituciones, constituyen en la actualidad una de las fuentes más directas en las que obtener información sobre la magnitud y características del problema y su estado actual.

Como el problema es de dimensiones mundiales, la UNESCO realizó una encuesta acerca de los centros dedicados al estudio de la conversión de aguas salinas en aguas dulces, habiendo publicado los resultados en su "Survey on Institutions engaged in Research on Saline Water Conversion", que demuestra que el problema está siendo abordado en todo el mundo.

La consecuencia es la aparición en fechas relativamente muy recientes de numerosas publicaciones referentes a este tema. Mencionaré a continuación las de mayor importancia, que me han sido particularmente útiles para la redacción de esta lección y que son fuente de abundante información bibliográfica, independientemente de que en cada momento indique cuáles han sido los trabajos directamente consultados durante el desarrollo de la misma.

Son particularmente interesantes las obras de E. Hornsmann (1-8), sobre el agua considerada como un problema de todos los tiempos. La de K. S. Spiegler (1-9), que constituye un modelo de claridad de exposición acerca de los diferentes métodos de desalado, plétórica de datos útiles. La serie de artículos presentados en el Simposio de 1960 de la American Chemical Society sobre Conversión de aguas salinas, recogidos en una monografía (1-10). Quizás la publicación más amplia y reciente, respecto a la obtención de agua dulce a partir de agua del mar, sea el tomo 47 de las "Dechema Monographien", en que se recogen 54 comunicaciones presentadas en la XXXIX Reunión de la Federación Europea de Ingeniería Química, celebrada en Atenas en 1962 y publicado en febrero último.

Si unimos a éstas las publicaciones del Office of Saline Water (OSW) anteriormente mencionadas y las revistas especializadas del tipo del "Journal of the American Water Works Association" (JAWWA) y entre las nacionales la revista "Agua" —del Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua (Barcelona)—, tendremos una visión panorámica del conjunto de publicaciones sobre la conversión de aguas salobres, que considero de más interés.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

NOTAS

- (I-1) A. BELTRÁN, Inauguración del monumento a Martín Cortés en Bujaraloz.
- (I-2) Saint Exupery, Antoine de, *Terre des Hommes*.
- (I-3) *Cantos de los Oasis del Hogar*, Ed. Centauro S. A. 1944, México D. C.
- (I-4) *Sciences et Avenir*, Anon. Junio de 1963, pg. 397.
- (I-5) D. BERNET, *Sciences et Avenir*, Febrero de 1963.
- (I-6) R. COLAS, *De l'eventualité et de la nécessité de fabriquer de l'eau douce a partir de l'eau de mer*. "Dechema Monographien", Bd. 47 Nr. 781-804 (Frankfurt am Main).
- (I-7) ERICH HORNSMANN, *Wasser ein Problem jeder Zeit* (Dalp Taschenbücher Band 321) Lehnen Verlag München.
- (I-8) Ver (1-7).
- (I-9) K. S. SPIEGLER, *Salt Water Purification*. John Wiley and Sons Ed. Londres-Nueva York (1962).
- (I-10) *Dechema Monographien* Band 47. Nrs. 781-804 y 805-834, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatenwesen E. V. Verlag Chemie, (1962).

II

CANTIDAD DE AGUA NECESARIA

*Du wollst auch mich behüten
gnädiglich diesen Tag
vor Feur und Wassers Not,
vor bösem, schnellem Tod.*

MORGENLIED GEORG NIEGES (1525-1598)

El hombre vive en la Tierra inmerso en una prodigiosa corriente de vapor de agua que fluye en torno a él gigantesca, invisible y silenciosa, devolviendo a la atmósfera los quinientos mil millones de kilómetros cúbicos de agua que caen desde ella en forma de precipitaciones a lo largo de un año.

Si la distribución de este inmenso caudal de agua fuese uniforme en el espacio y en el tiempo, y la densidad de población también lo fuera, sería poco probable que se presentasen problemas de deficiencia de agua dulce sobre la superficie de la Tierra.

Pero por una parte, la distribución de las lluvias sobre los continentes es tal, que dos terceras partes de las tierras son áridas o semiáridas; y por otra, una multitud de factores han hecho que los hombres se hayan distribuido sobre la faz de la Tierra de forma sumamente heterogénea.

No es por ello sorprendente que en muchas circunstancias se presente un desequilibrio entre la cantidad de agua disponible en una localidad determinada y la necesaria.

La cantidad de agua necesaria para el consumo humano es sumamente variada. R. Colás (2-1) indica: *Un anacoreta puede vivir, por así decir, con el agua que contiene el aire que respira. Un habitante de una gran metrópoli moderna consume cantidades muchísimo mayores.*

Teniendo siempre en cuenta esta inherente variabilidad, podemos establecer un conjunto de estimaciones del consumo de agua por el hombre.

No tiene excesiva importancia, salvo en los países desérticos, el consumo necesario simplemente para aplacar la sed. Aun en el Sahara español no existen grandes distancias sin agua, y no tienen que hacerse muchos itinerarios que no disfruten de una escala diaria en algún pozo que permita beber a los hombres y sus ganados; es un desierto "atenuado". En las desoladas llanuras de los "Tanezruf", completamente estériles cualquiera que sea la estructura de su suelo, las caravanas no encuentran durante tres o cuatro días ni agua ni pastos.

Según Spiegler (2-2), la cantidad de agua necesaria para beber oscila entre 2 y 8 litros por persona y día, según el clima y la ocupación. En este sentido la conversión de las aguas salobres en aguas dulces para beber no puede considerarse nunca como un problema agudo. Spiegler cita cómo durante la segunda Guerra Mundial se utilizaron los destiladores por compresión de vapor denominados "Kleinschmidt", que eran capaces de producir 7.000 litros de agua por día a partir de agua del mar, con un consumo de 40 litros de gasolina; el precio de estas unidades es análogo al de un automóvil, y por tanto, la obtención de agua en condiciones extremas siempre se puede resolver.

Pero este consumo mínimo de agua tiene una tendencia constante a aumentar en cuanto el hombre empieza a desarrollar actividades culturales. Aunque la curva de crecimiento tiene al principio una pendiente muy pequeña, no tarda en aumentar con rapidez cada vez mayor. Así, Hornsmann (2-3) indica que en Alemania el consumo de agua por persona y día era de 10 litros en el año 1800. En 1900, después del desarrollo industrial, había aumentado hasta 100. En 1950, a 200, y en las diecisiete mayores ciudades alemanas había llegado a 280.

Estas cifras reflejan exclusivamente el consumo "doméstico", bebida y servicios higiénicos variados, que en la actualidad ya han crecido considerablemente.

Las siguientes cifras tomadas de Deutch (2-4), corresponden al consumo actual por habitante y día en diversos países y constituyen un claro índice del estado de desarrollo de los mismos:

LOCALIDAD	LITROS POR HABITANTE Y DÍA
Cirenaica	10
Haití-Túnez	38
Pueblos de Méjico	95
Ceilán	180
Capitales sudamericanas	450
Capitales europeas y norteamericanas	500

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Pero si se tienen en cuenta además los usos agrícolas e industriales, las cifras crecen de una forma vertiginosa. Deutch estima que en este caso las necesidades son del orden de 6.000 a 7.000 litros por habitante y día en los Estados Unidos.

R. Colás cifra el consumo total por habitante y año en las naciones europeas en 500-600 m³ (1.500 a 1.650 litros por habitante y día); pero indica que el desarrollo industrial ha producido ya en los Estados Unidos un consumo de 1.000 a 1.200 m³ por habitante y año, que los economistas han extrapolado a 1.500 m³ por habitante y año en 1980, y a 2.000 m³ en el año 2000. Es interesante analizar las razones de este salto prodigioso del consumo de agua desde los 2 a 8 litros por persona y día a las cifras de 6.000-7.000 litros por persona y día al incluir los usos agrícolas e industriales.

El análisis es sumamente interesante y ha sido realizado por Bradley (2-5), y otros autores como Uhden (2-6).

Por lo que se refiere al uso del agua en agricultura, Uhden menciona cómo para la producción de 1 Kg. de producto seco las plantas consumen cantidades de agua verdaderamente sorprendentes. Así, por ejemplo, el trigo tiene una relación de transpiración de 500; es decir, que toma 500 Kg. de agua del suelo que pasan a través de la planta para producir 1 Kg. de planta seca, de la que se puede estimar que el grano constituye el 50 por ciento. Por tanto, para la obtención de 1 Kg. de trigo seco se consume 1 m³ de agua. Las plantas forrajeras y prados tienen relaciones de transpiración que oscilan entre 350 y 800 (por ejemplo, la alfalfa tiene 800), con lo cual se comprende que si a esto se añade que del agua de riego parte se evapora y otra se filtra (el 60% aproximadamente), las cantidades de agua necesarias para regar sean muy grandes con respecto al peso de los productos agrícolas obtenidos.

Así, por lo que se refiere a los cereales, una hectárea de centeno consume en un año de cosecha media 800.000 litros de agua; una de trigo, 1,2 millones, y una de avena, 2,3 millones, (2-6).

Spiegler (2-7), evalúa en 10 millones de litros la cantidad de agua necesaria para el riego de una hectárea de tierra sometida a cultivo intensivo, y se comprende que, aunque esta cifra puede rebajarse por las aportaciones de lluvia, es tan elevada, que en cualquier caso el precio del agua utilizada tiene que ser forzosamente muy bajo.

Por otra parte, otros tipos de cultivos o bosques son también consumidores de cantidades de agua muy grandes. Gessner (2-7) menciona cómo una encina centenaria llega a tener aproximadamente 200.000 hojas con una superficie total de 1.220 metros cuadrados, a través de los cuales se evaporan en un día de verano unos 9.000 litros de agua; esto quiere decir que cada

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ

hoja, según el estado higrométrico, cede cada día del doble a ocho veces su propio peso de agua.

En general, los alimentos vegetales contienen cantidades de agua verdaderamente grandes. Para que sirvan como ejemplo tomaremos unos cuantos datos de la obra de Duval (2-8) sobre el agua:

	% de agua		% de agua
ajos	88,01	fresas	78,4
espárragos	95,34	manzanas	85,4
col	88,3	ciruelas	84,9
espinacas	93,40	uva	80,5
pimientos	85-91	naranjas	70-85
tomates	91,01		

Pero claro está que la evapotranspiración hace que este contenido en agua, con ser grande, sea despreciable frente al que la planta ha consumido para su formación. Así, Spiegler indica cómo en ausencia completa de lluvia, 1 m³ de agua de riego solamente produce 3 Kg. de naranjas y plantea la conclusión lógica de que en muchos casos será siempre más económico transportar los productos agrícolas a las áreas desprovistas de agua dulce, que tratar de cultivarlas en ellas si el agua que haya de utilizarse para regar es excesivamente cara. A este respecto debe tenerse en cuenta que, por ejemplo, aun cuando se llegase a obtener agua dulce por conversión de aguas salobres al precio de 9 ptas./m³ (cifra que aún no se ha logrado actualmente), este precio sería demasiado alto.

El consumo de agua para la producción de alimentos animales, constituidos fundamentalmente por grasas y proteínas, es mucho mayor aún. Bradley (2-5) calcula que para criar una ternera, que proporcionará aproximadamente 350 Kg. de carne, se necesitan dos años. Una ternera consume diariamente unos 15 Kg. de alfalfa y bebe unos 45 litros de agua al día. La alfalfa tiene una relación de transpiración de 800. Se deduce de aquí que cada Kg. de carne de ternera supone el consumo de 25 m³ de agua. (Señalemos incidentalmente que el 78% del mismo es agua).

Por tanto, una dieta constituida por 1/2 Kg. de grasas y proteínas y 1 Kg. de alimentos vegetales implica el consumo de 13,5 m³ de agua por persona y día.

Si se tiene en cuenta que la producción de proteínas y grasas animales impone consumos de agua 25 veces mayores que la obtención de un peso igual de productos cereales, se comprenderá mejor el porqué se está intentando por todos los medios el desplazamiento de las fuentes de proteínas hacia otros productos (pescado, planckton, algas) que pueden reducir la im-

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

portancia del consumo de agua y sobre todo hacia los vegetales, con lo que han surgido alimentos del tipo de la incaparina (proteínas de las semillas de algodón) o el saridole (extracto de soja), que son los primeros intentos de resolución del problema de la penuria de estos tipos indispensables de alimentos.

Pero además tenemos que contar con el consumo de agua por la industria. Podemos mencionar, simplemente como ejemplos que puedan servirnos de índice, cómo la fabricación de una tonelada de productos químicos exige por término medio el uso de 77 m³ de agua; una tonelada de papel requiere 600; una tonelada de hilo de rayón, 1.300, etc. (2-9).

Todo ello implica que disponer de recursos abundantes de agua sea una premisa que condiciona las posibilidades de un desarrollo industrial, y aunque en verdad muchos de los procesos industriales pueden reducir extraordinariamente el consumo de agua, ya que en realidad muchas veces más la usan que la consumen, lo cierto es que en los países muy industrializados el consumo o uso de agua por la industria llega a ser tan grande, e incluso a superar, al del agua destinada a fines agrícolas.

Spiegler (2-10) indica que el uso de agua en los Estados Unidos durante 1960 alcanzó las siguientes cifras:

USO DE AGUAS EN LOS ESTADOS UNIDOS EN 1960	MILLONES DE M ³ /DÍA
Industrias mayores	570
Agricultura	510
Consumo doméstico y otros fines	100

lo que arroja un total de 1.180 millones de m³/día, que repartido entre los 180 millones de habitantes en dicho año, representa un uso de 6.600 litros por persona y día.

Las cifras correspondientes a otras naciones son de magnitud semejante. En la República Federal Alemana se calculó el uso en 1953 en 7.000 millones de m³, estimándose que en 1963 será de 10.000 millones de m³ (2-11) y en cuanto a Francia, R. Colás (2-1) cifra el consumo de agua para fines domésticos en 2.000 millones de m³ en 1962, el de agua industrial en 6.500 millones de m³ y el de agua agrícola en 10.000 millones de m³. Estima, dada la tendencia del consumo, que en los años 1970-1975 el uso total llegará a ser de 33.000 millones de metros cúbicos por año.

Frente a estas previsiones de consumo debemos hacer un balance de las disponibilidades de agua en el mundo. Son particularmente interesantes las recopiladas por R. Colás (2-1) que evalúa la cantidad total de agua contenida en la Tierra en 45×10^{45} moléculas que se distribuyen de la forma que indica la siguiente tabla:

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ

YACIMIENTO	TIPO DE AGUA	VOLUMEN EN KM ³
Océanos y mares	salada; 35 g/litro	1350.10 ⁶
Hielos polares	agua dulce	25-30.10 ⁶
Lagos, ríos	agua dulce	250.000-300.000
Aguas subterráneas	agua dulce	250.000-300.000
Atmósfera	vapor de agua	15.000
Precipitaciones (lluvia, nieve, etc.)	agua dulce	400.000-500.000
Evaporación y evapotranspiración	agua dulce	400.000-500.000
Agua total de los ríos	agua dulce utilizable	40.000-50.000
Agua que puede extraerse de las capas freáticas	agua dulce utilizable	15.000

Considera así R. Colás que la cantidad total de agua disponible sobre la Tierra es anualmente de 55.000 a 65.000 kilómetros cúbicos.

Tomando como caso particular el de Francia y admitiendo que el aforo de todos sus ríos es de 175 mil millones de m³, se deduce que en el quinquenio 1970-1975 el uso llegará a constituir la cuarta parte de los recursos disponibles.

Pero en todo caso no puede dejarse de lado el hecho de la irregular distribución que hace que el problema de la escasez de recursos de agua se presente con carácter local en muchas ocasiones, aun cuando en otras zonas se cuente con un exceso de agua con respecto a las necesidades. Todo ello impondrá necesarias medidas de planteamiento y distribución de los recursos a escala nacional.

Ya en la actualidad, en las zonas en que las aguas superficiales son escasas y hay que extraer grandes cantidades de agua mediante pozos, se comprueba que se producen descensos de las capas freáticas, de las que se está extrayendo el agua como de una mina.

Aparte de todo ello es conveniente también que sometamos a análisis un poco más detallado el concepto de uso de las aguas, para lo que seguiremos las consideraciones de Faust (2-12).

Hay usos del agua que implican una "separación" de la misma de sus yacimientos naturales, mientras otros (p. ej., la navegación) usan el agua libre natural. Hay usos que "consumen" el agua, en el sentido de que ésta ya no puede volver a utilizarse (hasta que se condense nuevamente, p. ej., en el caso de la evapotranspiración), mientras que otros no implican "consumo" (p. ej., la refrigeración). Supone consumo el uso del agua en agricultura, en la medida en que es devuelta a la atmósfera por evaporación o evapotranspiración, o por incorporación a las plantas que crecen con su concurso. Representa consumo de agua industrial la incorporación a los productos de

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

la industria y no, por ejemplo, la obtención de energía eléctrica. Por ello muchos de los usos del agua más pronto o más tarde vuelven a dejar en libertad agua que puede volver a ser usada, con lo cual se produce automáticamente una multiplicación de los recursos.

Faust hace un balance (referido a los Estados Unidos) en que calcula que de la cantidad de agua dulce que es "separada" para su uso, un 33% es consumida, mientras que el 67% restante es agua que puede ser usada nuevamente, y más adelante hemos de ver que muchas veces el agua puede llegar a ser utilizada hasta ocho veces, lo que permite ampliar muy considerablemente los recursos naturales de una nación.

La distribución del agua "separada", entre los usos fundamentales, da un 51% para la industria, un 40% para la agricultura y el 9% restante para usos domésticos y varios (cifras correspondientes a un país fuertemente industrializado), mientras que la distribución del agua "consumida" es completamente diferente, calculándose que un 85% del "consumo" corresponde a los riegos, un 6% a los servicios públicos, un 5% a la industria y el 4% restante a usos varios.

NOTAS

- (II-1) R. COLÁS, *De l'eventualité et de la nécessité de fabriquer de l'eau douce a partir de l'eau de mer*. "Dechema Monographien", 47, 5.
- (II-2) K. S. SPIEGLER, *Salt Water Purification*, pág. 5.
- (II-3) HORNSMANN, *Wasser Ein Problem jeder Zeit*, pág. 64.
- (II-4) DEUTCH, *Chimie et Industrie*, 89, 5 (1963), 558.
- (II-5) BRADLEY, CH. C., *Science*, 138 (1962), 489.
- (II-6) UHDEN, en *Wasser die Sorge Europas*, pág. 46.
- (II-7) GESSNER, *Wasser im Dienst des Lebendigen*, en "Lebendige Erziehung", abril de 1954, p. 224.
- (II-8) DUVAL CL., *L'eau* ("Presses Universitaires de France", 1962).
- (II-9) MORLON, *Sciences et Avenir*, 197 (1963), 492.
- (II-10) K. S. SPIEGLER, l. c. Tabla 1.1.
- (II-11) KUMPF, *Das Wasser wird knapp*, "Beiträge zur kommunalen Versorgungswirtschaft", XV, Köln, 1954, pág. 6.
- (II-12) FAUST, R. J., *J. A. W. W. A.* 54, 5, 519 (1962).

III

CALIDAD DE LAS AGUAS DULCES

*Laudato si mi. Signore per Sor acqua la quale
e multo utile et humele et pretiosa et casta*

CÁNTICO DEL SOL, San Francisco

Por lo que respecta a la calidad de las aguas dulces podemos clasificarlas en aguas potables, aguas para usos industriales y aguas agrícolas. Cada uno de estos tipos tiene sus propias características y una posición diferente con respecto a las posibilidades del proceso de obtención por conversión.

La calidad de las aguas potables es sin duda la que está sometida a mayores exigencias, pues el hombre se ha manifestado desde tiempo inmemorial sumamente sensible frente a sus características. El siguiente delicioso fragmento de A. Cunqueiro puede servir para apreciar con qué cuidado trata el hombre delicado al agua potable: *Un chino erudito en manantiales —asignatura esencial en la perfecta civilización, como la que trate de los vinos— engañaba al agua de un célebre manantial yendo a recogerla con una vasija de barro en la que estaban incrustadas piedras del río... Traía el agua en una balsa, río abajo, al amor de la corriente, sin usar remo ni vela para que el agua creyese que viajaba libre y así llegaba perfecta para un irreprochable té de otoño.*

Evidentemente el agua dedicada a beber es preciosa y casta y no admite contaminación. Con frecuencia alcanza, en la forma de las llamadas aguas de mesa, precios altísimos, de 8.000 ptas./m³ por ejemplo, aunque lo normal es que el precio sea mucho más bajo (en Valencia de 2,25 ptas./m³). Pero los precios fluctúan muchísimo con las localidades. En los países industrializados en que la polución o contaminación de las aguas de superficie llega a ser muy acentuada, las aguas potables son las que mayores posibilidades ofrecen frente al proceso de obtención por conversión a partir de aguas salobres.

Así, R. Colás (3-1), admite que ante la creciente contaminación de las aguas naturales, podrá recurrirse sin duda a las técnicas de desalado que proporcionarán aguas de mejor calidad que las que en muchas ocasiones se consiguen a través de tuberías mal conservadas y vigiladas, de capas acuíferas mal protegidas o incluso de aguas de río contaminadas.

La preocupación por la contaminación de las aguas mediante productos químicos, muchas veces de difícil eliminación, es un problema de alcance mundial que obligará sin duda a dictar normas cada vez más restrictivas. Hornsmann, al escribir la obra tantas veces mencionada, señala claramente el problema de la polución de las aguas como uno de los más importantes: *Nuestra generación no es más que un eslabón en la cadena de muchas generaciones, cada una de las cuales tuvo su preocupación. Una de las preocupaciones fue siempre el agua, pues el agua no es un problema exclusivamente de nuestros tiempos, sino en todos los tiempos. Sin embargo, el centro de gravedad de la preocupación oscila. Antes fue la necesidad de agua, hoy es la polución y pronto volverá a ser la falta de un adecuado suministro* (1956). Y menciona una impresionante lista de productos químicos orgánicos e inorgánicos que tienen acceso hasta las aguas de superficie e inutilizan para el consumo cantidades extraordinariamente grandes.

Claro está que en muchas ocasiones la polución de las aguas es el necesario tributo al desarrollo de la industria, el comercio y otros sectores de la actividad humana de importancia trascendental.

Y la lucha contra la contaminación de las aguas es tanto más difícil cuanto que, como indica R. Colás, basta realizar un cálculo sencillo para demostrar que si vertiésemos un simple vaso de agua cuyas moléculas estuvieran *marcadas* (fueran causa de *contaminación*) en el océano y esperásemos a que se mezclase con todas las aguas del planeta, les conferiría una contaminación tal, que volviendo a tomar un vaso de mezcla encontraríamos en él 100 moléculas *marcadas*.

El problema se ha de tener muy en consideración si se quiere evitar la disminución de los recursos naturales de aguas potables, pues los tratamientos de coagulación, filtración y esterilización no siempre eliminan los tóxicos, los virus, los hidrocarburos, los fenoles, los detergentes y tantos otros productos de uso cada vez más generalizado. Y así no es extraño que en muchas ocasiones se tengan que establecer estaciones de vigilancia sobre la concentración de detergentes de uso doméstico en las aguas de los ríos (concretamente en el río Ohio), (III-11).

Se suele exigir que las aguas potables tengan un contenido de sales inorgánicas inocuas inferior a 500 ppm y sólo como excepción se admiten aguas que lleguen a las 1.000 ppm, aunque, como indica Spiegler (3-2), en

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

ciertos países cálidos, concretamente en el norte de África, llegan a utilizarse para beber aguas con 2.500 ppm.

Como las clases de sales disueltas pueden ser muy variadas, los límites de tolerancia varían mucho de unos casos a otros.

Por lo que respecta a la conversión de aguas salinas, el problema consiste, pues, en que para obtener agua potable es necesario reducir la concentración de sales desde 35.000 ppm (cuando se trata de agua del mar) o desde una cantidad variable en torno a las 5.000 ppm (si se trata de aguas salobres), hasta un límite de 1.000 ppm, de tal forma que el precio sea competitivo con el de las aguas dulces captadas por los métodos tradicionales.

Dado el consumo relativamente moderado de agua para beber, el precio puede alcanzar niveles mucho más altos que los otros tipos de agua, industrial o agrícola.

La calidad de las aguas agrícolas debe ser tal que contengan menos de 2.000 ppm de sales disueltas (3-3) y Wilcox (3-4) basa el criterio de idoneidad en el cumplimiento de tres condiciones: 1) Una concentración de átomos de boro que no pase nunca de un máximo de 3 ppm, si bien no suele ser superior a 1 ppm. 2) Una relación del contenido en ion sodio con respecto a la suma de los iones sodio, potasio, calcio y magnesio que no sea superior al 60%. Esta condición debe tenerse muy en cuenta si se obtiene agua por desalado del agua del mar, pues como los procesos de conservación suelen mantener la relación entre las concentraciones de los iones igual a la existente en el agua del mar, que es del 84%, sería necesario añadir iones Ca^{++} al agua obtenida antes de usarla para fines agrícolas. La razón de esta exigencia es que, en caso de que no se cumpla, se puede llegar a una salinización de los suelos (3-5). 3) Por último, en cuanto a la cantidad total de sólidos disueltos, Wilcox propone la siguiente escala de denominaciones que se encuentra sumamente divulgada:

CALIDAD	CONCENTRACIÓN DE SALES EN PPM
Excepcional	menos de 200
Buena	200 - 500
Satisfactoria	500 - 1.400
Dudosa	1.400 - 2.100
Impropia	más de 2.100

Salvando ciertas posibilidades futuras, establecidas por extrapolación aprovechando algunas características aún no sometidas a prueba experimental de las instalaciones nucleares gigantes, se reconoce que la obtención de agua para usos agrícolas por conversión de las aguas salobres queda fuera del

alcance de los métodos de conversión basados en la ingeniería química tradicional.

Las aguas industriales han de ser con frecuencia bastante puras, de baja salinidad y dureza, aunque como es lógico las condiciones de pureza varían ampliamente con el uso a que se destinen. Suele admitirse (3-6) que dentro de la variabilidad una cifra media aceptable es de 1.000 ppm.

La cantidad de casos diferentes que pueden presentarse es tan grande que es difícil establecer conclusiones de carácter completamente general. Es cierto que el agua destinada a las grandes centrales modernas tiene que purificarse a ultranza y tener una calidad excepcional. La norma, sin embargo, es que una fábrica no se instale en un determinado lugar si no puede contar de antemano con recursos suficientes de agua adecuada y de posibilidad de eliminar sus aguas residuales. Muchas veces la industria puede utilizar cantidades grandes de agua de río sin más tratamiento y ello plantea dificultades de tipo económico a los procesos de conversión.

Pero también es cierto que en muchas ocasiones se ha iniciado una política de economía que reduce extraordinariamente el volumen de agua industrial usado. La industria metalúrgica y en particular la del acero han logrado reducciones desde 270 toneladas por tonelada de acero a 6 toneladas, instalando circuitos cerrados para la utilización del agua y siguiendo el ejemplo de muchas fábricas de papel y azúcar, que desde hace años substituyeron los circuitos abiertos por otros cerrados que incluyen instalaciones de depuración propias. Y es igualmente cierto que algunas instalaciones de desalado (3-7) han demostrado que, aun obteniendo agua dulce a precio muy superior al que normalmente se paga en la industria, pueden permitir el establecimiento de fábricas a orilla del mar en parajes completamente exentos de agua dulce.

También recientemente se ha marcado una tendencia, que se intensificará, al uso de aguas salobres particularmente en los procesos de refrigeración en escala industrial (3-8), y Othmer (3-9) indica que la tecnología de los plásticos ha permitido ya resolver el problema de manejar aguas salinas mediante conducciones y válvulas que son tan poco afectadas por el agua del mar, o por las aguas salobres, como puedan serlo las de hierro por el agua dulce.

El uso de aguas saladas para reemplazar a las aguas dulces en muchas ocasiones, no sólo en la industria sino en las aplicaciones domésticas, se impondrá como rectificación lógica a una situación que, siendo sorprendente, solamente parece normal por la frecuencia con que se presenta. Resulta desalentador pensar en los grandes dispendios realizados para la captación de aguas dulces naturales mediante costosas obras hidráulicas y para transportarlas hasta las ciudades, sometiéndolas a cuidadosas y costosas técnicas

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

de depuración y de distribución (que son en buena parte la causa del precio que alcanzan), o en los gastos que provoca la conversión de las aguas salobres, si se tiene en cuenta que esta agua dulce tan laboriosamente conseguida se utiliza simplemente para diluir residuos de los más variados tipos, o incluso en refrigeración para arrastrar cantidades de calor sumamente pequeñas en comparación con las que tuvieron que invertirse, por ejemplo, para obtenerla por destilación. Othmer prosigue indicando que es inconcebible el purificar el agua del mar hasta lograr una pureza de unas ppm para seguidamente inutilizarla simplemente impurificándola hasta unas cuantas partes por ciento, o para diluir una cantidad de calor insignificante con respecto al consumido para obtenerla.

No es por ello sorprendente que se haya insistido (3-10) en el hecho evidente de que el agua del mar tiene en números redondos 35 veces más sólidos disueltos que las aguas residuales y que la eliminación de los sólidos de las aguas residuales podrá conseguirse sin duda a mejor precio que la de los sólidos del agua del mar, marcando la posibilidad de que en las zonas en que se disponga de aguas dulces, las grandes instalaciones de depuración lleguen a ser prácticas en gran escala antes que las de conversión de aguas saladas.

Naturalmente estas consideraciones no tienen aplicación a las aguas agrícolas, pues en este caso el 85% del agua usada queda consumida.

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ

NOTAS

- (III-1) R. COLÁS, *Dechema Monographien*, B. 87, pág. 5.
- (III-2) SPIEGLER, *Salt Water Conversion*, pág. 5.
- (III-3) RICHARDS, L. A., *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, Handbook, No 60 U. S. Government Printing Office, Washington (1954).
- (III-4) WILCOX, L. V., *The Quality of Water for Irrigation Use*, "U. S. Department of Agriculture, Technical Bulletin", No 162, U. S. Government Printing Office. Washington D. C.
- (III-5) JACKSON, *Chemical Analysis of Soils*, Cap. 10.
- (III-6) ESHAYA, A. M. Y DODGE, B. F., *British Chemical Engineering*, 1959, 194.
- (III-7) BRUCE, A. W., *Five Years of Experience with Desalinization at Morro Bay* J. A. W. W. A., 53 (1), (1961), 11.
- (III-8) SPIEGLER, I. c.
- (III-9) OTHMER, *Dechema Monographien*, Bd. 87, 867.
- (III-10) WOLMAN, *Impact of Desalinization on the Water Economy*, J. A. W. W. A. 53, (1961), 119.

IV

APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS DE AGUA

La expansión de nuestra civilización requerirá un uso más eficiente del agua en aquellas áreas que disfruten de abundancia de este valioso producto y el incremento de los procesos de desalado en las demás.

SPIEGLER

El agua dulce es la piedra angular de nuestra civilización. Aun cuando disponemos de un generoso mecanismo natural de purificación del agua, diversas circunstancias que ya hemos descrito anteriormente hacen que los problemas de escasez de agua dulce se hayan generalizado, saltando de las zonas áridas a las húmedas y de los países subdesarrollados a los más avanzados desde un punto de vista técnico.

Al someter a juicio las posibilidades de los métodos de conversión de aguas saladas en agua dulce, debe tenerse en cuenta siempre que nos encontramos ante un problema en plena evolución, con tendencia a agravarse como consecuencia del rápido incremento de las zonas de escasez, debido a la expansión demográfica y al consumo *per capita* con el aumento del nivel de vida.

Si se tienen presentes estas circunstancias se comprenderán mejor palabras como las siguientes (4-1): *Reconocemos que la conversión de aguas salinas en agua dulce no constituye en sí misma una panacea para la gran variedad de problemas que plantea al mundo la escasez de agua. Pero en último término, el logro de la conversión puede significar la diferencia entre la vida y la muerte, entre la salud y la enfermedad, incluso la línea divisoria entre la guerra y la paz.*

En la actualidad, cuando el precio del agua obtenida por conversión es aún más elevado que el agua dulce natural en la mayoría de los casos, es lógico que los procesos de conversión se hayan utilizado solamente en puntos

sumamente alejados de toda fuente de agua dulce. Así, funcionan desde hace algunos años en las Islas Vírgenes, en Kuwait, en Aruba, en Welcom, instalaciones de obtención de agua dulce a partir de aguas del mar o salobres que se van extendiendo incluso a localidades de las zonas templadas como la isla de Guernesey.

Pero aún en las zonas en que hay abundancia de agua dulce, el incremento incesante del consumo exige la utilización de yacimientos cada vez más lejanos, o de aguas de inferior calidad, lo que supone un aumento de los problemas de captación, conservación, transporte y tratamiento con el consiguiente aumento de precio, que puede llegar a ser más alto que el agua obtenida por conversión.

Aun cuando dos terceras partes de las tierras emergidas son áridas o subhúmedas y constituyen por tanto zonas favorables para la aplicación de los métodos de conversión, si cuentan con yacimientos próximos de aguas saladas, es evidente que aun en el caso en que se resolvieran totalmente los problemas económicos que tiene planteados la desmineralización, sólo podrá regarse o industrializarse una fracción reducida de las mismas.

La conversión del agua del mar cuenta con la ventaja de que el yacimiento es inagotable, pero situado en condiciones poco favorables por su mínimo nivel y por el frecuente alejamiento de las zonas áridas.

Pero como por otra parte el problema de la escasez de agua puede surgir en zonas costeras densamente pobladas, o como consecuencia de la conveniencia económica de la explotación de recursos en zonas deficitarias de agua, es evidente que cuando la conversión sea posible por contar con yacimientos próximos, constituye una gran promesa, sobre todo si se logra la reducción de los gastos hasta un nivel que permita su uso en agricultura.

No obstante la situación actual, en que los procesos de conversión se encuentran en muchas ocasiones en la fase de plantas piloto y produciendo agua mucho más cara que la que utiliza la industria o la agricultura, ha hecho que el problema haya sido enjuiciado a veces desfavorablemente.

Así hay autores como Lamb (4-2), que creen que estaría fuera de la realidad el creer que la conversión de las aguas salinas pueda llegar a reemplazar a los suministros que son utilizados actualmente, aun admitiendo que seguirá desempeñando un papel de importancia creciente al proporcionar recursos de agua dulce a las localidades situadas en áreas donde se produzca una escasez "crítica" de la misma.

Wolman (4-3), calcula que en 1965 los procesos de destilación de agua del mar o de aguas salobres producirán probablemente unos 260 millones de litros de agua dulce por día en todo el mundo. Teniendo en cuenta que, por ejemplo, las necesidades del consumo en Francia son de unos 55.000

millones de litros por día en la actualidad, se comprende que el papel desempeñado por la conversión de aguas salobres es aún muy pequeño.

Por otra parte, es cierto que, como reconoce Faust (4-4), algunas veces se ha exagerado el valor de los progresos conseguidos en la economía de los procesos de conversión, al considerar que se ha logrado reducir a la quinta parte aproximadamente los precios del agua convertida en el período comprendido entre 1952 y 1962, porque lo cierto es que muchos de los problemas de la conversión no están resueltos y que nos encontramos lejos aún de alcanzar utópicos resultados mediante la misma.

Si se tiene en cuenta el volumen enorme de las aguas dulces naturales usadas, se comprende fácilmente que independientemente de las posibilidades de los procesos de conversión se haya pensado en la puesta en práctica, con carácter inmediato, de una serie de medidas encaminadas a un aprovechamiento más perfecto de los recursos de aguas dulces naturales. Faust indica los siguientes:

- 1) Reducción de la evaporación de los depósitos abiertos,
- 2) Modificaciones de clima,
- 3) Uso más eficiente del agua en la agricultura, industria y consumo doméstico,
- 4) Re-uso (uso repetido) del agua "no consumida",
- 5) Aumento del almacenamiento de aguas superficiales y subterráneas,
- 6) Control de las inundaciones,

que son análogas a las que indica Deutch (IV-5) y a las que sin duda surgirán como consecuencia del *Decenio Hidrológico Internacional* que la UNESCO se propone iniciar en el año 1965 para estudiar todas las formas posibles de llegar a conseguir una mejor economía en el uso de los recursos naturales de agua.

Algunas de ellas han sido sometidas ya a estudio experimental. Por ejemplo, se ha comprobado la posibilidad de reducir en un 30% las pérdidas por evaporación del agua almacenada en depósitos abiertos, mediante la adición de pequeñas cantidades de alcohol cetílico, que dan origen a la formación de una capa monomolecular. Esta reducción tiene un marcado interés, porque las pérdidas por evaporación pueden llegar a ser superiores incluso al agua usada. En los procesos que usan la evaporación solar para la obtención de agua dulce, se reconoce que la evaporación normal del agua de un depósito hace descender el nivel del mismo en 0,5 cm. diarios y si los climas son extremadamente secos las pérdidas pueden ser mucho mayores (sólo como curiosidad recordaremos que en los mares interiores formados en los desiertos de Asia, el descenso de nivel llega a ser de un metro en un mes).

El uso reiterado de las aguas está muy generalizado en la industria, aprovechamiento de las aguas de los ríos por las sucesivas comunidades ribe-

reñas, etc. Se cita como ejemplo aleccionador el de la ciudad de Baltimore en la que la Bethlehem Steel Co. usa las aguas residuales de la ciudad, una vez depuradas, con fines industriales.

Que es mucho lo que puede esperarse de la adecuada ordenación de las aguas de los ríos mediante aplicación de las técnicas tan perfectas de la ingeniería civil, no necesita demasiados comentarios si pensamos, por ejemplo, en la regulación del Guadiana con una capacidad total de embalse, mediante cinco presas, que se elevará a 3.786 millones de metros cúbicos de agua y transformará en regadío 129.549 hectáreas; en los ambiciosos planes de la FAO para restablecer la agricultura en los países del Oriente Medio, cuna de nuestra civilización; en la construcción de la presa de Assuan; o en los proyectos de irrigación mediante las aguas del Don, el Volga y el Amu Darya.

Pero aunque todas estas medidas contribuyan a frenar el posible desequilibrio entre los recursos de aguas dulces y las necesidades en determinadas zonas, se ha de tener muy en cuenta que a pesar de todo son muchos los expertos que creen, como indica Deutch (l. c., pág. 357), que en muchas áreas se tendrá que recurrir forzosamente a la construcción de instalaciones de desalado, aun a los desfavorables precios actuales, en un plazo de cinco a diez años. Como índice de esta realidad se menciona que sólo en los Estados Unidos existen 11.000 comunidades para las que resultará más barato el proceso de conversión, aun a 1 \$ los 1.000 galones (16 pts./m³), que la conducción de agua dulce desde las fuentes más próximas a las mismas.

Uno de los estudios más detallados de las condiciones en que los procesos de desalado son económicamente ventajosos, frente a los tradicionales de la ingeniería civil, se debe a Koenig (4-6). Llega a la conclusión de que los gastos ocasionados por la explotación de los yacimientos de agua dulce natural (presas, acueductos, tuberías; cisternas y depósitos reguladores para asegurar un suministro regular, a pesar de las fluctuaciones del caudal del yacimiento y de la demanda; tratamientos a que deba someterse el agua; administración) gravitan tanto más sobre el precio del agua dulce cuanto mayor sea la distancia a que se encuentra el yacimiento y menor la cantidad de agua transportada. Es más costoso (por unidad de volumen) construir y manejar instalaciones para cantidades pequeñas. Por ello la conversión de aguas salinas puede resultar la solución más económica para una comunidad si ésta tiene que captar el agua dulce a una distancia superior a un límite específico que depende del caudal transportado. Esto es lo que hace que por el momento la conversión de aguas salinas parezca más atractiva para comunidades pequeñas que para grandes ciudades, pero se ha de considerar que toda disminución que se logre en el precio del agua obtenida por conversión hace que disminuya la distancia límite desde la que puede

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

verificarse la captación de aguas, para que sea ésta la solución más favorable desde un punto de vista económico.

Cuando como consecuencia de la falta de aguas de buena calidad deban utilizarse aguas duras para usos domésticos (y en muchos casos como aguas industriales), debe tenerse en cuenta que los gastos ocasionados por su purificación pueden ser mayores de lo que a primera vista aprecie el consumidor. Así, se han indicado como gastos que deben incorporarse a los del agua de uso doméstico los siguientes: Consumo de agua mineral, embotellada o procedente de fuentes menos duras; ablandamiento doméstico de las aguas; gastos ocasionados por el exceso de corrosión a causa de la naturaleza fuertemente mineralizada de las aguas y finalmente exceso de consumo de jabón o detergentes. Todos ellos añadidos a los del agua, hacen aumentar sensiblemente su precio.

Pero las razones más poderosas, que hacen que el estudio de los procesos de desalado se prosiga con tan extraordinario interés, nacen de las comparaciones entre los recursos de agua dulce y el consumo, particularmente si se tiene presente el carácter creciente de éste.

Así es típica la afirmación de Deutch (l. c., pág. 356), que indica que en los Estados Unidos se admite que la cantidad total de agua dulce que será "retirada" para todos los fines en 1980 será prácticamente igual a todos los recursos que se puedan desarrollar.

Cuando se tiene en cuenta esta posibilidad, se comprende el interés que tiene el poder utilizar la fuente inagotable que es el agua del mar, que hace que el estudio de las técnicas de desalado se cuente entre los más apasionantes de nuestro tiempo.

Morlon (4-7) señala cómo ya en todo el mundo se empieza a considerar al agua con el mismo respeto con que hasta ahora la venían tratando los habitantes del desierto. Recordemos abreviada la narración de Saint Exupery en su libro *Viento, arena y estrellas*: "Se había invitado a los notables de una tribu de beduínos a visitar Francia. Llegaron a un nacimiento de agua, potente, ante el que quedaron extasiados: Ante sus maravillados ojos se hizo patente la majestad de Dios. El guía indica: ¡Sigamos! —Un momento aún. —Pero si no hay nada más que ver, ¡sigamos! —¡Debemos esperar! —Pero ¿hasta cuándo? —¡Hasta que pare!".

V

LAS AGUAS SALINAS

*El mar es como un viejo camarada de infancia
al cual estoy unido por un salvaje amor,
yo respiré de niño su salobre fragancia
y aún llevo en mis oídos su bárbaro fragor.*

TOMAS MORALES

Fragores y fragancias del mar capaces de desencadenar en todos nosotros viejas añoranzas, ansias de liberación, de evasión de los problemas de cada día. Una brisa del mar, leve perfume, inspira a Baudelaire

*Guiado por tu aroma hacia climas de ensueño,
veo un puerto repleto de mástiles y velas*

y cuando el mar es nuestro mar y entra en conjunción con la tierra es capaz de producir verdaderos milagros, como el que hiciera suspirar a Goethe

Mignon,

*¿Conoces la tierra donde florecen los limoneros?
donde las doradas naranjas refulgen entre el obscuro follaje,
donde una brisa suave nos llega desde el azul del cielo,
donde crecen los mirtos y los altos laureles.*

¿La conoces?

Allí, ojalá pudiese llevarte hasta allí, amada mía.

Este acercarnos al mar de la mano de quienes lo han amado nos hará percibir, sin embargo, algo sumamente sutil en el carácter del mar, que se manifiesta como una eterna contradicción.

El mar es a un tiempo camino y frontera; por paradoja, al tiempo que une, separa. Es transparencia y luminosidad que deja atisbar profundidades

sin fondo y sin luz. Es quietud y reposo... y agitación constante. Blanca espuma que flota y que no es blanca, pues refleja a la vez el color de las nubes y el puro azul del cielo.

Para nosotros el mar es insinuación de soluciones fáciles a complejos problemas, que resulta engañosa y desafía a nuestro ingenio con impensadas dificultades.

Porque nosotros que hemos dejado de ser niños nos acercamos al mar para que nos entregue sus tesoros. No somos ya como los niños que cantara Rabindranath Tagore, que *se reúnen en las playas de todos los mundos. No saben nadar ni saben echar la red. Mientras el pescador de perlas se sumerge y el mercader navega en sus navíos, los niños escogen piedrecillas y las vuelven a tirar. Ni buscan tesoros, ni saben echar la red.* Nosotros cada vez que tomamos en nuestras manos unas piedrecillas lo hacemos para buscar en ellas algo con que hacer frente a las necesidades de la vida y para nuestra desgracia comprobamos que estas piedrecillas son cada vez menos ricas en las substancias que de ellas deseamos. Por ello nos vemos obligados a utilizar yacimientos cada vez más pobres y entre éstos se encuentra el mar.

El mar constituye para los químicos la esperanza de un yacimiento inagotable de toda clase de elementos químicos, pero la mayoría de ellos inmensamente diluídos. Diluídos en una fabulosa reserva de agua, hacia la que se dirigen necesariamente las miradas de cuantos piensan en el problema de la escasez de agua dulce.

Pero el mar, para seguir siendo contradicción y paradoja, ni nos entrega fácilmente sus raros tesoros ni su agua abundante.

El agua, que es muy humilde como dijera San Francisco, va buscando siempre los lugares más bajos y en su correr sobre la Tierra va arrastrando, como ya escribiera Leonardo de Vinci, *los metales de sus minas y disolviendo parte de éstas los lleva hasta el Océano y los demás mares, de los que ya no se separan con las nubes que formarán los ríos, de modo que el mar debe de ser más salado en nuestro tiempo de lo que haya podido serlo en cualquier tiempo anterior.* Por lógica que aparezca a primera vista esta descripción del proceso de formación de las aguas del mar, es lo cierto que los hechos son bien diferentes como hemos de ver.

Y es que el mar, como nos dice Hemingway, tiene algo de femenino,

El viejo siempre pensaba en el Mar como en un ser femenino, como en alguien que concede o niega grandes favores, como en alguien que cuando hace algo duro o malo es porque no puede evitarlo. La luna le afecta como a una mujer.

El viejo siempre hablaba de la mar que es como la gente le llama en castellano cuando le ama.

El primer secreto que hemos pretendido arrancarle al mar ha sido el de su edad. La evasiva no ha podido ser más femenina. Hablando de sus comienzos Rachel L. Carson en su célebre obra *El mar que nos rodea*, nos dice: Los comienzos suelen ser sombríos y así sucede con el origen de la mar, la gran madre de la vida. Muchas han sido las discusiones acerca del modo y manera en que la Tierra obtuvo sus océanos y no es sorprendente que las distintas explicaciones no sean concordantes, pues la verdad llana e ineludible es que no había nadie que presenciase su nacimiento y la ausencia de testigos de vista siempre tiende a producir un cierto desacuerdo. Así la historia del mar se ha tenido que ir descifrando laboriosamente mediante los testimonios dejados escritos en las rocas. Aunque no hubiese hombres para presenciar este nacimiento cósmico, las estrellas, la luna y las rocas estaban allí y tuvieron mucho que ver con que la Tierra recibiera sus mares.

Lo cierto es que no tenemos ni siquiera una teoría firme sobre el origen de nuestra Tierra. Las más recientes observaciones destacan lo extraordinario que resulta que un Universo en el que predominan los elementos químicos ligeros, el hidrógeno y el helio, aparezcan acumulados en los planetas los demás elementos pesados; acumulados en proporciones verdaderamente extraordinarias. En el mismo Sol, aparte del hidrógeno y del helio, los demás elementos no llegan a constituir ni la centésima parte de su inmensa masa. Contrasta esto con lo que sucede en la Tierra, donde la situación es inversa, siendo el helio y el hidrógeno componentes menos abundantes que los átomos más complejos tales como el oxígeno, el silicio, el aluminio, el hierro o el magnesio.

Esto produce una doble impresión: En primer lugar se aprecia que la materia solar es completamente inadecuada para la formación de los planetas y por otra parte resulta que el Sol es de la composición normal en el Universo, mientras que la Tierra y los demás planetas constituyen verdaderas excepciones desde el punto de vista de su composición química.

Hoy que ya vamos sabiendo algo acerca de las condiciones que permiten la formación de los núcleos pesados, gracias a las experiencias de síntesis termonuclear y a las observaciones que revelan que estas síntesis se están produciendo en las estrellas, nos vamos acostumbrando a pensar que la Tierra y los demás planetas tuvieron un nacimiento ciertamente espectacular. Para Fred Hoyle, la Tierra nació como consecuencia de la explosión de una Nova, que hizo desaparecer una estrella gemela del Sol. La Tierra no sería más que el leve residuo de una violentísima explosión cósmica.

...se ha apagado el fuego. Queda sólo un blando montón de ceniza donde antes estuvo ondulando la llama...

Una vez formada, atravesó capas en las que capturó del polvillo cósmico, aparte de los elementos acumulados en su litosfera, los materiales radiactivos y particularmente las moléculas que forman su atmósfera, vapor de agua y anhídrido carbónico. Las historias de Venus, de Mercurio y de Marte son algo diferentes, porque atravesaron otras zonas de polvillo cósmico. Particularmente Venus no retuvo nada de agua y Marte cantidades menores que la Tierra. Entre las grandes condensaciones de agua que constituyen parte de las formaciones superficiales de los planetas se encuentran el anillo de Saturno, formado por gigantescas acumulaciones de cristales de hielo, sus satélites interiores que son al parecer inmensas bolas de nieve, y, desde luego, los mares de la Tierra.

Difícil es encontrar en la literatura científica un acuerdo sobre la evolución de la composición de las aguas del mar. Desde los que suponen un mar primigenio formado por aguas acídulas que reemplazó a una laguna estigia de rocas fundidas y gases malolientes, que se fue depurando y aumentando de salinidad por el aporte de las aguas de los ríos, hasta los que afirman que el mar no es más que el residuo dejado al cristalizar el magma de rocas fundidas.

Se pierde, pues, en la lejanía de los tiempos el origen de nuestro mar:

Y la Tierra no tenía forma y estaba vacía y la obscuridad se cernía sobre la superficie de los abismos. Y el Espíritu de Dios se movía sobre la superficie de las aguas,

(Génesis)

Por ello Unamuno califica al mar de

trémulo espejo de los ojos del Señor,
primera cuna de la vida.

Las diversas hipótesis acerca de la evolución de la composición del agua del mar son estudiadas en las obras de Geoquímica (5-1), si bien se va abriendo camino la idea de que la composición media del agua del mar no ha experimentado cambios grandes en millones de años (5-2). Teniendo en cuenta el aporte de sales por las aguas de los ríos, y las proporciones completamente distintas en que se encuentran los iones componentes de las distintas sales en las aguas de río y en las del mar, no queda más remedio que admitir que en el mar se producen una serie de reacciones biológicas (asimilación del calcio y del silicio y consumo de cantidades muy grandes de otros elementos aun diluïdos por la flora y la fauna del mar), así como reacciones de formación de precipitados y sedimentos, que nos dejan al mar como una disolución acuosa diluïda de ciertas sales, en la que se verifican constante-

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

mente gran variedad de reacciones químicas y procesos biológicos que mantienen su composición prácticamente constante, aun cuando puedan producirse variaciones locales de composición, debidas a los distintos regímenes de lluvias, a los cambios de temperatura, a la presencia o ausencia de ciertos elementos consumidos en la nutrición de los seres vivos que los pueblan y a otros factores.

El agua del mar contiene todos los elementos conocidos, pero la mayoría de ellos están contenidos en proporciones pequeñísimas, siendo denominados elementos menores. El contenido en sales del agua del mar, en zonas alejadas de las costas, rara vez excede del 3,8% o es inferior al 3,3% (5-3). Excepcionalmente se encuentran salinidades pequeñas en los mares cerrados correspondientes a regiones muy frías en los que la evaporación es pequeña y las precipitaciones abundantes (así el Báltico tiene salinidad de 7.000 ppm [0,7%], mientras que en los mares cerrados de zonas subtropicales, a los que afluye poca agua dulce, hay pocas lluvias y la evaporación es muy intensa, la salinidad alcanza valores máximos. Así, las aguas del Mar Rojo y del Golfo Pérsico tienen salinidades de hasta 43.000 ppm.

La salinidad del agua del mar se define por los oceanógrafos como "la cantidad total de material sólido en gramos contenido en 1 kg. de agua del mar, cuando todos los carbonatos se han transformado en óxidos, el bromo y el yodo se han reemplazado por cloro y toda la materia orgánica se ha oxidado por completo".

Esta definición es la consecuencia del hecho de que la determinación exacta del contenido en sales del agua del mar por el método directo de desecación y pesada, presente ciertas dificultades, porque las sales retienen tenazmente la humedad y si la desecación se verifica a temperaturas que sean suficientemente altas para eliminar las últimas trazas de la misma, se descomponen los carbonatos y se pierde el yodo y el bromo y algo del cloro.

Por otra parte es posible determinar con precisión la suma de los cloruros y bromuros por precipitación en forma de sales de plata. Por ello, teniendo en cuenta la proporción constante en que se encuentran entre sí las cantidades de las distintas sales presentes en el agua del mar, han surgido dos conceptos para expresar la concentración total de sales disueltas en el agua del mar que son la salinidad y la clorinidad.

Knudsen definió ya en 1912 la salinidad como el peso en gramos de los sólidos que pueden obtenerse a partir de 1 kg. de agua del mar, sometiendo a desecación hasta pesada constante a 480°C, reduciendo las pesadas al vacío. La cantidad de cloruros y bromuros perdida se recompensa añadiendo un peso de cloruros igual a la pérdida de los dos haluros durante la desecación. La salinidad es, pues, el peso de las sales totales por kg. de

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ

agua, menos el peso de los iones bicarbonato y carbonato y la diferencia entre el peso de los iones bromuro y su equivalente en cloruro. Un agua de mar tiene algo más de sales disueltas de lo que indique su salinidad.

Los halógenos precipitados en forma de sales de plata pueden valorarse con toda precisión. El precipitado está constituido por una mezcla de cloruro y bromuro de plata y una traza de yoduro que se puede considerar insignificante. La clorinidad es la masa de cloro equivalente a la masa de halógenos contenida en un Kg. de agua del mar. Tiene interés práctico porque existe una relación directa que la liga con la salinidad y que fue establecida por Knudsen:

$$S \text{ ‰} = 0,030 + 1,8050 \text{ Cl ‰}$$

En cuanto a la composición de las sales disueltas en el agua del mar, el 99,5 % está formado por nueve iones que se encuentran en proporción constante. Algunos de los componentes menores y de los gases disueltos varían mucho de concentración como consecuencia de la actividad de los organismos vivos.

Jenkins (5-4) da la siguiente composición aproximada del agua del mar, expresada en contenido en sales en partes por millón:

SALES	PARTES POR MILLÓN
NaCl	27.213
MgCl ₂	3.807
MgSO ₄	1.658
CaSO ₄	1.260
K ₂ SO ₄	863
CaCO ₃	123
MgBr ₂	76
Total	35.000

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Harvey (5-3) da la siguiente proporción de los componentes mayores para un agua de mar de salinidad $S \text{ ‰} = 35,00$:

	GRAMOS POR KILOGRAMO	GRAMOS POR LITRO a 20°C (p. e. = 1,025)
Sales totales	35,1	36,0
Na ⁺	10,77	11,1
Mg ⁺⁺	1,30	1,33
Ca ⁺⁺	0,409	0,42
K ⁺	0,388	0,39
Sr ⁺⁺	0,010	0,01
Cl ⁻	19,37	19,8
SO ₄ ⁼	2,71	2,76
Br ⁻	0,065	0,066
H ₃ BO ₃	0,026	0,026
HCO ₃ ⁼	0,023-0,27	

La presencia de estas sales disueltas confiere al agua del mar propiedades físicas que hay que tener en cuenta en los procesos de conversión en agua dulce. En la tabla siguiente indicamos los valores correspondientes a las propiedades más directamente relacionadas con algunos de los procesos de conversión (5-4) para aguas de distinta salinidad:

Partes por millón	10.000	20.000	30.000	35.000	40.000
Punto de congelación, °C	-0,53	-1,07	-1,63	-1,91	-2,20
Presión osmótica, atm.	6,4	13,10	19,7	23,1	26,6
Elevación del punto de eb.°C	0,16	0,31	0,47	0,56	0,64
Reducción de la presión de vapor, mm.	4,2	8,5	13,0	15,2	17,6

En cuanto a las denominadas aguas salobres, la concentración de los distintos componentes varía mucho de unas a otras, aun cuando los componentes mayores sean los mismos que hemos mencionado para el agua del mar.

Una clasificación de las mismas de acuerdo con su concentración es la siguiente (5-5):

Ligeramente salobres	1.000 - 3.000
Moderadamente salobres	3.000 - 10.000
Fuertemente salobres	10.000 - 33.000
Agua del mar	33.000 - 38.000
Salmueras (Mar Muerto, Salt Lake, etc.)	más de 38.000

La composición química de las aguas salobres es, pues, cualitativamente, la misma que la del agua del mar, pero la variación de concentración de

los distintos iones puede suponer para las técnicas de desalado problemas mucho más difíciles de resolver que los que plantea el agua del mar.

Se comprende fácilmente que han quedado en disolución los iones más refractarios frente a los procesos de precipitación y por ello los que implican más dificultades para las posibles técnicas químicas de purificación.

Pero al mismo tiempo muchos de los iones contenidos son capaces de presentar a los métodos de desalado complicaciones que emanan de las reacciones de formación de compuestos poco solubles cuando se concentran las aguas saladas o se modifica su temperatura. Veremos que este hecho plantea verdaderas limitaciones a las técnicas de desalado.

También es interesante que señalemos, a la vista de la tabla de composición del agua del mar, que existen ya procedimientos de obtención en escala industrial de los productos químicos útiles que contiene, tales como sal común, bromo y magnesio. Recientemente se está estudiando la posibilidad de la obtención de las sales potásicas. En algunos casos se ha tratado de establecer una simbiosis entre los beneficios que pueda producir la obtención de productos químicos de las aguas salobres y la favorable modificación que los mismos producen al reducir la concentración de las sales que han de eliminarse por desalado.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

NOTAS

- (V-1) BRIAM MASON, *Principles of Geochemistry*, 194.
- (V-2) SPIEGLER, *Salt Water Purification*, pg. 1.
- (V-3) HARWEY, H. W., *The Chemistry and Fertility of Sea Waters*, Cambridge University Press (1955), pgs. 1, 4, 125.
- (V-4) JENKINS D. S., *Fresh Water from Salt*, "Scientific American", 100 (1957), 37.
- (V-5) FAUST R. J., *J. A. W. W. A.* 54 (1962), 519.

VI

DESALAR

Desalar quitar la sal a una cosa como la cecina, el pescado salado, etc.

Desalar quitar las alas; estar con las alas abiertas.

Desalar sentir vehementes anhelos de conseguir alguna cosa.

DICCIONARIO DE LA REAL ACADEMIA

He aquí cómo por curiosa coincidencia la palabra *desalar* tiene acepciones bien diversas y que sin embargo son aplicables a los distintos aspectos que hoy presenta el problema de la conversión de las aguas salobres en aguas dulces.

En todo el mundo se manifiestan vehementes anhelos de conseguir desalar, quitar la sal, a las aguas salobres, a las aguas del mar. En todo el mundo se está ya "con las alas abiertas" iniciando el vuelo para remontar este problema, y aun a nuestro pesar, hoy por hoy, tenemos que "quitar las alas" a los excesivamente optimistas que consideran que el problema está ya resuelto.

No es extraño encontrar hasta en las revistas diarias manifestaciones que indican que "el problema del agua en los desiertos y en el mundo en general ha sido resuelto para el futuro. El desarrollo de procesos para la conversión del agua salada en agua dulce en gran escala ha puesto a nuestra disposición la única fuente de agua realmente inagotable: el agua del mar" (6-2).

Es indudablemente cierto que el problema de la conversión de las aguas salobres en agua dulce ha experimentado en años recientes un impresionante avance hacia su resolución y que las perspectivas futuras son alentadoras. Pero particularmente por lo que se refiere al anhelo de "hacer florecer los desiertos", hemos de reconocer que por el momento, como nos dice Othmer (6-2) en la comunicación final que cierra como broche de oro el conjunto de trabajos presentados al simposio de Atenas sobre desalado del agua del mar, *que los ingenieros químicos han admitido su derrota ante el problema de desalar*

el agua del mar a un precio suficientemente bajo para que pueda ser usada para regar, al menos por los procedimientos hasta ahora ensayados, que son indudablemente los más poderosos de la técnica actual. En el más reciente informe sobre el estado de este problema (6-3), se indica que aunque las instalaciones experimentales construidas por el O S W han permitido obtener resultados que son incluso más prometedores de lo que inicialmente se creyó posible conseguir, éstos han venido a poner de manifiesto que la información básica que poseemos sobre el agua y los sistemas acuosos, no es suficiente para vencer las dificultades con que tropiezan los procesos que se vienen usando y remediar sus deficiencias. Es necesario abórdar el problema siguiendo nuevas directrices que no están incluidas en los estudios realizados hasta el presente, por lo que aproximadamente la mitad de los cuantiosos créditos de investigación disponibles, deberán invertirse en el fomento de la investigación básica, en un esfuerzo para acumular más conocimientos acerca del agua misma.

Es ciertamente singular que el problema de separar la sal de las aguas salobres sea en verdad de tanta envergadura. En una época en que estamos acostumbrados a los diarios éxitos de empresas colosales, como la utilización de la energía nuclear o la realización de exploraciones espaciales, sorprende que el problema de quitar al agua del mar un 3,5% de sales sea técnicamente tan complicado que sólo en los Estados Unidos los estudios iniciados en 1952 hayan consumido más de 25 millones de dólares sin alcanzar la solución deseada.

El problema es difícil, nos indica Gillam (6-4), no porque haga intervenir aspectos nuevos o complicados de la química, la física o la ingeniería, sino por la condición necesaria de que el agua dulce haya de ser conseguida a *bajo precio*. Se trata por tanto de un problema económico, cuya dificultad nos hace reconocer que desde luego puede ser tan difícil hacer algo tan sencillo como separar las sales de las aguas salobres a un precio muy bajo, como hacer algo tan complejo como lanzar naves espaciales cuando para ello no se impone ninguna limitación de medios económicos.

La esencia del problema radica en que el agua dulce, en los países situados fuera del mundo árido, de lluvias abundantes e hidrografía diversificada, tiene un precio que es menor que el de cualquier otro producto del mercado y es al mismo tiempo el artículo más necesario y de mayor demanda y consumo.

Cierto que el precio fluctúa con la abundancia o escasez y que no hay que olvidar, como nos dice Saint Exupery, que en el desierto el agua puede llegar a valer lo que valga su propio peso en oro... y aun más, y esto hace que las facetas del problema económico sean variadísimas. Pero aun así, voces muy autorizadas como la del Noland (6-5), han centrado perfectamente la posición

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

actual de los procesos de conversión. Según Noland, es posible asegurar que los procesos actuales permitirán disponer de agua en cantidad suficiente para atender todas las necesidades domésticas e industriales, excepto las de riego, en las regiones áridas o de humedad escasa, en un futuro inmediato. Pero al mismo tiempo también puede asegurarse con la misma firmeza, que no existe ni la más remota posibilidad de que las nuevas fuentes sean tan baratas como las actuales. No se trata de un problema de inflación. Es una ley natural, que en el desarrollo de los recursos los puntos óptimos y más baratos sean los primeros que se utilicen, de modo que necesariamente después es preciso empezar a utilizar recursos más caros.

Por ello aun el agua dulce natural tendrá que ser más cara a medida que se vayan invirtiendo totalmente los yacimientos más favorables y hay que contar con una tendencia alcista de los precios del agua dulce.

Por otra parte, los métodos de conversión de aguas salobres han realizado constantes progresos hacia su objetivo de disminuir el precio del agua obtenida, y así, por ejemplo, el precio de un m³ de agua obtenida por destilación de agua del mar mediante destiladores relámpago de efecto múltiple, bajó desde 47,50 ptas. a 18,70 entre 1950 y 1960 y el de la electrodiálisis de 1 m³ de aguas con 2000 ppm, desde 17,45 a 9,50 ptas. en el mismo período.

Todo ello hace pensar que en muchas circunstancias las curvas de precios del agua dulce natural y del agua obtenida por conversión llegarán a cruzarse más o menos pronto. Y de hecho así ha sucedido ya en algunos puntos en que el agua obtenida por conversión es la más barata que se puede conseguir.

Carrer (6-6), en un informe titulado "Perspectivas brillantes para el desalado del agua del mar", publica gráficos que permiten reconocer cómo la discontinuidad existente entre el precio del agua producida por conversión y la obtenida por los métodos tradicionales, se está cerrando rápidamente por lo que se refiere a las aguas de uso doméstico e industrial, aunque desde luego no se dispone de precios que puedan competir con los tradicionales para las grandes cantidades de agua que se necesitan en agricultura.

Como quiera, pues, que el problema que nos ocupa es de tipo económico, lo que quiere decir tanto como de tipo humano, no estará de más que para que no se pierda la perspectiva ante las limitaciones de las soluciones conseguidas hasta la fecha, citemos algunas cifras que nos proporciona Othmer (6-7), al recordarnos cómo el motor de toda industria es la obtención de los lógicos beneficios que merece quien resuelve una necesidad humana. Se puede apreciar la importancia de los procesos de conversión si se piensa que círculos bien informados han estimado que sólo en los Estados Unidos, se espera que las ventas de instalaciones y equipos para el desalado de aguas salobres alcancen en los próximos veinte años la cifra media de 15 millones de

dólares, que supera a la que actualmente se invierte en todas las instalaciones de elaboración de productos químicos.

Y aparte de todo continúa la pugna para conseguir mejores resultados, habiéndose incluido en el programa de investigaciones el estudio de la estructura y propiedades físico-químicas del agua y de los sistemas acuoso⁸; el de la cinética, termodinámica y fenómenos de transporte; las transiciones de fase, química y física de las superficies; estudios biológicos y de sistemas orgánicos y de materiales estructurales, aparte de los pertinentes estudios económicos (2-3).

Todo ello nos hace reconocer que el problema de la conversión es de enorme trascendencia para el futuro inmediato de la Humanidad y se plantea frente a la Ciencia y la Técnica como un verdadero reto.

Nadie mejor que Clark (6-8) ha expresado la posición de continuo desafío o reto que las humanas necesidades plantean a la Ciencia y la Técnica contemporáneas. Se espera de ellas que contribuyan poderosamente a asegurar la paz, el bienestar y la salud.

No es necesario hacer una relación de los extraordinarios logros conseguidos en todos los terrenos. El método científico y su eficacia son bien conocidos. La eficacia del trabajo en equipo, el sinérgismo logrado cuando un conjunto de mentes trabajan al unísono para resolver un problema, ha permitido espectaculares éxitos.

Estos éxitos han permitido reconocer la fecundidad de la investigación básica, realizada en principio para lograr nuevos conocimientos por su valor intrínseco (pero siempre con la esperanza de que estos conocimientos serán útiles) y han puesto de relieve el continuo entrecruzamiento de las distintas ramas del saber, condición necesaria de todo resultado fértil.

Y como consecuencia de todo ello ha nacido una irreductible fe en el poder de la Ciencia y la Técnica dentro de sus propios campos de acción, como medios al servicio de las humanas necesidades. Cada vez que se produce la amenaza de la falta de algún elemento necesario para conservar la vida humana, con el fin de que el hombre pueda seguir cumpliendo su elevada misión en la Tierra, surge en nosotros la misma maravillosa frase que resume en cuatro palabras la impresionante descripción de Conrad en *Tiphon*. Describe Conrad una singular hazaña marinera. "El capitán Mac Wirr se ha hecho cargo de un nuevo barco, expresamente construido para navegar por el mar de la China. El "Nan-Shan" se enfrenta con un tifón. La mañana era espléndida, el mar como el aceite apenas ondulaba..., pero en la sala de mapas del "Nan-Shan" el capitán se enfrentaba con una caída vertical del barómetro. El barómetro era excelente. La época del año y la posición del barco en el globo terrestre daban a la caída barométrica la naturaleza de una inme-

diata profecía. El rostro del capitán Mac Wirr no dejaba sin embargo traslucir la inquietud interna: Sin duda se nos viene encima un tifón”.

La decisión es singular. Se resume en cuatro maravillosas palabras: “She’s done for”, “el barco está hecho para esto”. Ante la inmensa furia de los elementos, la confianza del capitán en su barco: no rectificó el rumbo.

Así nosotros pensamos que cuando graves problemas asedian al porvenir de la Humanidad podemos confiar en que la Ciencia y la Técnica han demostrado sobradamente que son expresión de la capacidad humana para vencer las dificultades. Que están justamente hechas para eso. Y al mismo tiempo, el científico y el técnico, como nos dice Clark (6-8), *se dan perfecta cuenta de que los conocimientos y el pensamiento humano solos no son suficientes. Que existen áreas de la vida ante las que el científico y el filósofo tienen que enmudecer y en las que tenemos que seguir escuchando al poeta y al profeta. Lo que no puede expresarse mediante las frases profundas de la sabiduría humana, debe alcanzarlo el hombre a través del lenguaje de la inspiración religiosa, del arte, de la música. No podemos dejar de proclamar nuestra necesidad de una fe elevada y heroica que sostenga el esfuerzo humano con convicciones que den dignidad y dirección a nuestros días, permitiendo que vivamos nuestras vidas con belleza y con nobleza.*

NOTAS

- (VI-1) *Life International*, 15 julio 1963, 144.
- (VI-2) D. F. OTHMER, *Sea Water Conversion. Some Possible Trends in Future Developments*, "Dechema Monographien", 47, pg. 870 (1962).
- (VI-3) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 10 de junio de 1963, 41 (23), (1963), 46.
- (VI-4) W. S. GILLAM, *Symposium on Saline Water Conversion, Introduction, Saline Water Conversion, Advances in Chemistry Series, 27* (1960). American Chemical Society.
- (VI-5) Citado por W. S. GILLAM y J. W. McCUTCHAM, *Science*, 134 (N.º 3485), (1961), 1041.
- (VI-6) ANÓN. *Chem and Eng. News*, 41 (1963), 31.
- (VI-7) OTHMER, l. c., pg. 868.
- (VI-8) CLARK, *Enciclopedia de Química* (Ed. Omega). Introducción.

VII

MÉTODOS DE DESALADO

“El tiempo está ligado a la materia y al espacio. Si no se modificase nada no podríamos distinguir el ayer, el hoy y el mañana. Es la diferencia entre la inmortalidad y la eternidad. La inmortalidad es la prolongación infinita del tiempo. La eternidad es la ausencia de tiempo.”

B. DECAUX

El tiempo puede ser considerado como una variable más que interviene en los cálculos matemáticos de los procesos físicos y químicos con el mismo título que las demás.

Podemos realizar cálculos correspondientes a procesos situados fuera del tiempo, en los que esta variable no interviene. Son, por ejemplo, los de los procesos termodinámicos reversibles, a los que se suele caracterizar diciendo que transcurren con infinita lentitud. Estos procesos tienen como rasgo común el ser los que exigen un consumo mínimo de energía para el logro de una determinada transformación; por lo que constituyen modelos a los que trataremos de acercarnos siguiendo la humana ley del esfuerzo mínimo.

Pero su característica situación al margen del tiempo, impide que podamos utilizarlos para satisfacer nuestras cotidianas necesidades.

Vivimos inmersos en el tiempo y necesitamos utilizar procesos reales, en los que nos apartaremos de las condiciones de reversibilidad, mediante el uso de discontinuidades y gradientes finitos de condiciones, a los que recurriremos para que los procesos sean tan rápidos como sea necesario. Estos procesos exigirán un mayor consumo de energía que los procesos ideales, pero es posible que sean los más económicos, porque en los procesos reales el consumo de energía no es más que uno entre los muchos factores que determinan el precio de una operación.

Debemos tener en cuenta que aunque encontrásemos una fuente de energía totalmente gratuita, como, por ejemplo, la energía solar, su utilización requerirá el uso de equipos industriales, instalaciones y fábricas con el consiguiente esfuerzo económico de inversión de capital y atención a los gastos de operación y mantenimiento.

Por ello en los procesos reales podemos apreciar la concurrencia de distintos factores económicos. Por una parte, los que se refieren al consumo de energía. Se tratará de que éste sea mínimo, lo que exigirá que los procesos se aproximen a las condiciones ideales de reversibilidad. Pero por otra parte, cualquier aproximación a este ideal requerirá un mayor esfuerzo económico en equipos e instalaciones. Los precios relativos de la energía y de los aparatos tendrán un papel de suma transcendencia en la búsqueda de las condiciones óptimas, quedando además un amplio margen para que el poder creador de la mente humana diseñe aparatos, asocie procesos, escoja condiciones y materiales, automatice las operaciones y logre así avances económicos.

Además en el planteamiento de los procesos desde su ángulo puramente económico intervendrán factores externos. Un proceso costoso en un área determinada, podrá resultar económico en otra que disponga de ciertas fuentes de energía a bajo precio. El precio relativo de los distintos tipos de energía, por ejemplo, eléctrica o térmica, favorecerá a uno u otro tipo de proceso y de forma parecida, las posibilidades de disponer de agua de refrigeración o las facilidades para la evacuación de las aguas residuales podrán ejercer influencias decisivas.

Si a ello añadimos las posibilidades de simbiosis con otros procesos, tales como la obtención de energía eléctrica o de productos químicos, comprenderemos fácilmente por qué ninguno de los métodos que han sido propuestos para la conversión de las aguas salobres en aguas dulces es el óptimo absoluto desde un punto de vista económico.

Son éstas las causas de que se hayan desarrollado muchos métodos de desalado. Según Fischbeck (7-1), pasan de seiscientas las propuestas realizadas para la obtención de aguas dulces.

En 1952 el Office of Saline Water (7-2) seleccionó treinta y dos métodos diferentes como los más prometedores; y diversos autores, como Fischbeck (7-3) y Dodge (7-4), relacionan la enorme variedad de fenómenos y operaciones de ingeniería química que permiten la separación de un componente de una disolución homogénea, aprovechando la acción de diversos campos de fuerza o gradientes.

El estudio sistemático—muchas veces en plantas piloto—de las operaciones de separación, ha permitido ir seleccionando las que presentan mejores características económicas, que podrían agruparse de la siguiente forma:

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

- 1) Destilación y evaporación.
- 2) Congelación y cristalización.
- 3) Procedimientos que usan membranas.
- 4) Otros métodos físicos, químicos y biológicos.

El O S W ha publicado un reciente informe (7-5), en que se detalla algo más de esta clasificación de procesos que pueden convertir las aguas salinas en agua potable:

1) **DESTILACIÓN.** Constituye un grupo de métodos que son los más perfeccionados desde el punto de vista técnico. Las variantes son muy numerosas y el volumen que ha alcanzado su estudio se refleja en el hecho de que toda la primera parte del tomo 47 de las "Dechema Monographien", que recoge las comunicaciones presentadas en el Simposio de Atenas de la Federación Europea de Ingeniería Química sobre la "Obtención de agua dulce a partir de agua del mar", se dedique exclusivamente a los distintos aspectos de las operaciones de destilación.

Como trabajo de conjunto sobre las características generales de los procesos de destilación de las aguas saladas mencionaremos el de Silver (7-6), que indica que la destilación del agua del mar es un método que ha sido sometido a prueba de una forma total, siendo práctico desde el momento en que puede dar agua dulce a precios que pueden entrar en competencia con los logrados por los métodos tradicionales de captación de aguas (salvo para fines agrícolas). Según Silver, los demás métodos de desalado tienen que recorrer aún mucho camino para alcanzar la posición que hoy ocupan los métodos de destilación.

2) **HUMIDIFICACIÓN.** Un segundo grupo de métodos, análogos a los de destilación, de los que difieren porque la transferencia de masas y de calor se verifica a temperaturas inferiores a las de ebullición. Como el más característico entre ellos estudiaremos más adelante el proceso de evaporación solar.

3) **PROCESOS QUE USAN MEMBRANAS.** Se basan en la separación de partículas que difieran en tamaño y carga eléctrica, o en estado de carga eléctrica, mediante membranas adecuadas. Sus características generales han sido expuestas en un excelente artículo de conjunto de E. Wegelin (7-7).

4) **CONGELACIÓN.** Una serie de métodos basados en la separación de agua pura en forma de fase sólida por enfriamiento de una disolución salina. Se han desarrollado con posterioridad a los de destilación y electrodiálisis, pero presentan caracteres económicos muy favorables. Fischbeck (7-8) ha descrito magistralmente las características de los mismos.

5) **FORMACIÓN DE HIDRATOS.** Se trata de procedimientos relacionados en cierto modo con los de congelación, pero de fundamento químico. Presentan ciertas ventajas que los hacen sumamente sugestivos.

6) **EXTRACCIÓN CON DISOLVENTES.** Métodos basados en la propiedad de ciertos compuestos orgánicos de extraer agua exenta de sales de las disoluciones salinas sin perder su carácter de fase independiente. Los métodos de extracción con disolventes se han incorporado a la resolución de multitud de difíciles problemas de química inorgánica en escala industrial. Para la extracción del agua de sus disoluciones salinas, se están estudiando como compuestos más prometedores las aminas secundarias y terciarias con cinco y seis átomos de carbono, muy substituídas; los glicoles y los éteres de los glicoles. Las aminas tienen características más favorables (puntos de ebullición bajos, pequeña viscosidad, facilidad para dar fases separadas). Los problemas fundamentales con que tropieza el procedimiento son: la selectividad incompleta de los disolventes (las extracciones han de realizarse en columnas), la necesidad de grandes superficies de transformación de calor y la retención de los disolventes por las aguas madres y el agua dulce que hace necesaria la recuperación. Son métodos aun no industrializados. Sus posibilidades se están ensayando mediante pequeñas plantas piloto.

7) **MÉTODOS QUÍMICOS.** Se trata de procedimientos como el propuesto por Zarchin, que estudiaremos más adelante, en los que la obtención de agua dulce se logra mediante reacciones de precipitación de los iones contenidos en las aguas salobres con aprovechamiento de los productos químicos precipitados. Tiene gran importancia la posibilidad de asociar con mutuo beneficio la obtención de agua dulce y la de productos químicos de aplicación comercial, tales como las sales potásicas, el magnesio, etc.

8) **OTROS MÉTODOS.** Existen otros muchos métodos, pero nuestro estudio tiene que circunscribirse a aquellos que en la actualidad ofrecen mayores perspectivas desde un punto de vista económico. Tiene importancia, no obstante, pensar en que, por ejemplo, el OSW incluye como campo de investigación el estudio de los procesos biológicos por los que los seres vivos obtienen el agua dulce a partir de aguas salinas. La maravillosa capacidad de los mismos para realizar complejíssimos procesos químicos en condiciones de extraordinaria suavidad, puede llegar a ser el modelo de procesos industriales del futuro.

En los capítulos siguientes estudiaremos un conjunto de métodos suficiente para que se comprendan las directrices seguidas en el extraordinario esfuerzo que se está realizando para la conversión de aguas salinas.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

- (VII-1) FISCHBECK, K., *Dechema Monographien*, Bd 47, 755 (1962).
- (VII-2) *Demineralization of Saline Waters*, "A Preliminary Discussion of Research Programm with an Outline and Description of Potential Processes and a Bibliography". OSW. 1952.
- (VII-3) FISCHBECK, K., *Chimie et Industrie*, 79 (1958), 563.
- (VII-4) DODGE, F., *Am. Scientist*, 48, 476 (1960).
- (VII-5) ANÓN: *Chemical and Engineering News*, 41 (23) (1963), 47.
- (VII-6) SILVER, R. S., *A review of distillation processes for fresh water production from the Sea*, "Dechema Monographien", Bd. 47, 19.
- (VII-7) WEGELIN, E., *Review of membrane processes for fresh water production from the sea*, "Dechema Monographien", Bd. 47, 427.
- (VII-8) FISCHBECK, K., *Neue Methode zur Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser durch Ausfrieren*, "Dechema Monographien", Bd. 47, 755.
- (VII-9) ZARCHIN, *Chemical Abstracts*, 53 (1959), 13523.

VIII

ECONOMÍA DE LOS PROCESOS DE DESALADO

"Agua, no tienes gusto, ni color, ni olor. No es posible definirte. Se te paladea sin conocer."

SAINT EXUPERY

El agua es una sustancia extraordinariamente anómala. A pesar de que algunas de sus constantes físicas nos sirven como puntos de referencia, lo cierto es que todas sus propiedades físicas son anormales.

Es un líquido cuyas moléculas se encuentran intensamente asociadas, conservando en buena parte la estructura del hielo.

Mal electrólito por excelencia, es casi paradójico que disuelva gran cantidad de sales a cuyos iones hidrata intensamente.

Por otra parte, gran número de sustancias orgánicas adoptan en su seno el estado coloidal y son transportadas por ella, de modo que aunque el agua sea de un valor nutritivo prácticamente nulo, resulta indispensable para todos los procesos vitales.

La gran capacidad del agua para asociarse consigo misma y con los iones y sustancias en ella dispersos, es sin duda la causa fundamental de las dificultades con que tropiezan los métodos de conversión de aguas salinas en agua dulce.

Si admitimos que el proceso de separación del agua pura se verifica por ósmosis inversa en condiciones ideales, es decir, sin tener en cuenta el carácter iónico de las partículas disueltas, siendo la presión osmótica del agua del mar 24,8 atmósferas a 25°C, se podrán obtener 1.000 litros de agua dulce aplicando un trabajo reversible de 24.800 litros atmósfera, o sea de 0,703 kwh.

Este consumo mínimo de energía, que viene a ser equivalente a la que se desprende cuando se disuelven en el agua pura las sales que contiene el agua del mar, es independiente del proceso reversible que se utilice.

Fue calculado por Murphy (8-1) para los distintos procesos de conversión del agua del mar.

Como ya hemos indicado anteriormente, el consumo mínimo no puede lograrse nunca si se utilizan procesos reales, que se caracterizan por su irreversibilidad y aunque constituya un modelo al que los procesos reales tratan de aproximarse para reducir su consumo de energía, lo cierto es que todo intento de alcanzar la reversibilidad lleva implícito un aumento de las dimensiones de la instalación, por lo que en cada caso se han de establecer las condiciones óptimas en función del precio relativo de la energía y del equipo necesario para su utilización.

Un ejemplo sencillo permitirá comprender el alcance de esta limitación. Supongamos un intercambiador de calor, proyectado para el transporte de una determinada cantidad de calor, por unidad de tiempo, de un medio a otro. Para que la velocidad de transporte alcance el valor deseado, necesitaremos establecer entre ambos medios una determinada diferencia de temperaturas. Suponiendo que, para aproximarnos a las condiciones de reversibilidad, disminuyéramos a la mitad el valor del desnivel térmico manteniendo idénticas todas las demás condiciones, es evidente que tendríamos que aumentar al doble la superficie de transmisión de calor y si pretendiéramos que el desnivel fuera infinitamente pequeño, necesitaríamos disponer de una superficie de transmisión infinitamente grande.

Estas importantes relaciones han sido sometidas a estudio, particularmente por Tribus y sus colaboradores (8-2), y constituyen parte esencial de todo proyecto de instalación de conversión de aguas salinas.

Se ha de tener en cuenta que cualquier desviación de las condiciones de reversibilidad, por ligera que parezca, se traduce en aumentos muy grandes de la cantidad de energía consumida. Así, por ej., Spiegler (8-3), para que se aprecien mejor las consecuencias de trabajar en condiciones no reversibles, aduce el siguiente ejemplo: Supongamos un proceso en que se pierde energía, como consecuencia de que el agua destilada y las aguas madres que quedan como residuo de la destilación permanecen a 3°C por encima del agua del mar que entra en el destilador. La pérdida de calor se eleva a 3.000 kcal/m³ de destilado y aguas madres. Si se supone que se convierte en agua dulce la mitad del agua del mar, esto hace que la cantidad de calor perdida sea de 6.000 kcal/m³. Comparando esta cantidad de calor con la necesaria para que el proceso se verifique reversiblemente, que es de 835 kcal/mol, se ve que la pérdida de calor provocada por este desnivel de temperaturas, relativamente pequeño (y necesario para que el intercambio de calor entre los productos de la destilación y el agua que entra en el destilador se verifique a una velocidad suficiente), es de siete veces la energía necesaria para un proceso de conversión ideal.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Eshaya y Dodge (8-4) admiten que mediante las mejores instalaciones de que podía disponerse en 1959, las cantidades de energía que se consumían en los procesos de conversión eran del orden de veinte veces la cantidad mínima correspondiente a los procesos reversibles.

Queda, pues, un amplio margen para lograr, mediante el esfuerzo técnico, una mejora de condiciones a la que se puede llegar aplicando una serie de recursos tales como el aumento de capacidad de las instalaciones, la mejora de las velocidades de transmisión de calor, el uso de diseños más perfectos, el empleo de materiales de construcción más baratos, la lucha contra la corrosión y las incrustaciones, la mejor calidad de las membranas, etc.

La siguiente tabla, tomada de Gillam y McCutchan (8-5), indica la evolución de precios del m³ de agua dulce obtenido por conversión a partir del agua del mar, por una serie de procedimientos. Se refleja por una parte la influencia del perfeccionamiento de las instalaciones y por otra la de las dimensiones de las mismas, acumulada a la de los perfeccionamientos posibles en el futuro:

CAPACIDAD				~ 4.10 ³ m ³ /día	~ 40.10 ³ m ³ /día
PROCESO	AÑO:	1950	1955	1960	1965
Destilación "relámpago" con múltiples efectos.	48-64	29-41		19	9,5
Destilación con compresión de vapor.	48-80	25-48		28	16
Destilación mediante LTV.				16	9,5
Congelación directa.				16	9,5
Electrodialisis.					
Sólidos totales:					
*4.000 ppm		21		16	9,5
2.000 ppm		18		9,5	5
* precios en pts/m ³		perfeccionamientos		dimensiones	

Se trata de precios medios, que no tienen en cuenta las posibles variaciones como consecuencia de la influencia de factores locales. Es notable la previsión, por extrapolación, de precios iguales para procesos diferentes. En un interesante trabajo de Dodge y Eshaya (8-6), se estudia la termodinámica de los diferentes procesos de desalado, llegándose a la conclusión de que,

p. ej., a pesar de la aparente ventaja que parecen tener los métodos de congelación sobre los de destilación, por ser el calor de fusión del hielo la séptima parte aproximadamente del de ebullición del agua, cuando se tienen presentes todos los factores termodinámicos, esta ventaja queda sumamente reducida, en cuanto se refiera al consumo de energía.

No debe olvidarse que la cantidad de energía no es el único factor energético a considerar y que tanto la clase de energía que se utilice, como la temperatura a que deba suministrarse la energía térmica, tienen enorme importancia desde el punto de vista de la economía de los procesos.

La energía térmica es la más barata; y cálculos sencillos (8-7) permitirían reconocer que en un proceso de destilación, para el que se cuente con un desnivel térmico de 100 a 25°C, los procesos que utilicen energía mecánica (p. ej., la destilación con compresión de vapor), deben requerir gastos de energía inferiores a la quinta parte de los exigidos para un proceso del mismo rendimiento que consuma energía térmica, si el valor de la energía consumida por los mismos ha de ser inferior.

También son muy importantes las disminuciones de precio del agua dulce, obtenida por conversión, que pueden lograrse mediante procesos de simbiosis industrial. Por ejemplo, en aquellas localidades en que se necesite simultáneamente energía eléctrica y agua dulce, la combinación de un centro de obtención de energía eléctrica y producción de agua dulce, puede ser la solución para los problemas económicos del proceso de conversión. En un reciente informe titulado "Perspectivas brillantes para el desalado del agua del mar" (8-8), Carr indica en qué condiciones los beneficios obtenidos mediante la venta de energía eléctrica podrían rebajar el precio del agua hasta 10 centavos los 1.000 g. (1,50 pts. m³).

De todos los trabajos publicados acerca de las posibilidades de estas asociaciones, quizás sea el más alentador el de Hammond (8-9), que estudiaremos más adelante en el capítulo XV.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

NOTAS

- (VIII-1) MURPHY G. W., *The Minimum Energy Requirements for the Sea Water Demineralization Processes*, OSW "Research and Development Programm", Report n.º 9 (1956).
- (VIII-2) TRIBUS, M. Y EVANS, R., *Thermo-economic considerations in the preparation of fresh-water from sea water*, "Dechema Monographien", 47, 43.
- (VIII-3) SPIEGLER, *Salt Water Purification*, Cap. 3 y Apéndice pg. 139.
- (VIII-4) ESHAYA Y DODGE, *Large-scale demineralization of sea and brackish water*, British Chemical Engineering (1959), 194.
- (VIII-5) GILLAM, W. S., y Mc CUTCHAN, J. W., *Science*, 134, n.º 3485 (1961), 1041.
- (VIII-6) DODGE Y ESHAYA, *Thermodynamics of Some Desalting Processes, Saline Water Conversion, Advances in Chemistry Series*, 27. "American Chemical Society".
- (VIII-7) SILVER, R. S., *Dechema Monographien*, Bd. 47, pg. 22.
- (VIII-8) ANÓN, *Chem. and Eng. News*, 25 feb. 1963, pg. 31.
- (VIII-9) HAMMOND, R. P., *Nucleonics*, 20 (N.º 12) (1962), 17, 45.

IX

QUÍMICA DEL MAR

*En la playa he hallado un caracol de oro
macizo y recamado con las perlas más finas.*

.....
*Lo acerqué a mis oídos y las azules minas
me han contado en voz baja sus secretos tesoros.*

RUBÉN DARÍO

He aquí que el poeta supo intuir que las azules minas del mar ocultan fabulosos tesoros. Nos tranquiliza un tanto a los que miramos al mar, con la esperanza de que guarde entre sus secretos la solución de muchos de nuestros problemas de hoy.

El mar nos ofrece una reserva inagotable de agua que no nos otorga fácilmente. Como al mismo tiempo encierra cantidades también prácticamente inagotables de todos los elementos químicos, no es sorprendente que se haya pensado en él como yacimiento de materias primas (9-1).

Al mismo tiempo, la asociación de los procesos de beneficio de las sustancias que contiene, con la conversión en agua dulce, se considera mutuamente beneficiosa y capaz de resolver en buena parte los problemas de obtención de agua dulce en condiciones económicamente aceptables. Así se señala como uno de los puntos a estudiar, por la División de investigación del OSW, el desarrollo y venta de los subproductos minerales contenidos en el agua del mar (9-2).

Este aprovechamiento del mar como fuente de materias primas es ya muy antiguo en ciertos aspectos. La economía de la sal común en el mundo antiguo dio gran importancia al comercio de los fenicios y en nuestra vieja Iberia, de costas dilatadas y secas, tuvieron gran importancia las salinas, en aquella época en que un paréntesis trazado entre Jaffa y Gades comprendía la casi totalidad del mundo conocido.

El esplendor de las ciudades de la liga Hanseática o el de Venecia tuvieron una relación directa con el comercio de la sal. Se comprende que una substancia que hoy sigue siendo piedra angular de la industria química, haya podido ser en muchas ocasiones causa de la prosperidad de las naciones. Se han abierto rutas para el transporte de la sal; se han desencadenado revoluciones para poder disponer libremente de ella. *“La sal nos ha sido entregada libremente por la Providencia como el aire y el agua”*, tuvieron que defender los ingleses en 1822.

Con el tiempo, otros elementos menos abundantes han pasado a ser extraídos del agua del mar. El bromo y el magnesio hicieron que el agua del mar pasase a ser nervio de la guerra en la última contienda mundial. La historia de ésta se hubiese escrito quizás de otra forma, si no se hubiera utilizado el agua del mar como fuente de estos dos elementos, indispensables en la industria aeronáutica. El contenido de magnesio en el agua del mar (1.330 gramos/m³), hace que ésta sea un inmenso yacimiento de sales magnésicas y los productos de ellas derivados.

En cuanto al bromo, baste considerar que el océano detenta un verdadero monopolio. Se calcula que más del 99% del bromo existente en la litosfera se encuentra en las aguas del mar. Existen instalaciones como la de Wilmington, que extraen cantidades del orden de 250.000 Kg. de bromo por mes.

Estas explotaciones ya existentes, pueden asociarse de diferentes formas con la obtención de agua dulce. Por ejemplo, si las fábricas de obtención de magnesio o de bromo fueran alimentadas con las aguas residuales de las instalaciones de conversión, concentradas hasta reducir su volumen a la mitad como es práctica corriente en los procesos de destilación o congelación, no sólo mejoraría su economía, sino que al mismo tiempo facilitarían a las fábricas de conversión una salida para sus aguas residuales.

Por otra parte, siendo el magnesio contenido en las aguas del mar o salobres un elemento perturbador, por su tendencia a formar productos insolubles que se depositan como costras indeseables sobre las zonas críticas de las instalaciones de conversión, su eliminación en forma de productos útiles favorecería extraordinariamente a los procesos de obtención de agua dulce, que acumularían a los beneficios logrados por la venta de aquéllos, la disminución de sus dificultades de funcionamiento.

Además, el agua del mar contiene a todos los elementos, aunque sea en concentraciones muy pequeñas, y la obtención de algunos de éstos ha sido siempre un señuelo para el ingenio de los químicos, que han dado pasos gigantescos en el aprovechamiento de yacimientos pobres a medida que el agotamiento de los yacimientos fáciles les ha obligado a utilizarlos.

Hay uno de estos elementos menores, el oro, cuya recuperación del agua del mar ha constituido siempre una formidable esperanza.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

El oro está contenido en el agua del mar en forma de partículas coloidales de concentración variable. Se ha supuesto que esta concentración es del orden de seis milésimas de miligramo por metro cúbico. Una cantidad ciertamente pequeña, pero cuyo significado cobra un nuevo aspecto cuando se piensa en las dimensiones del yacimiento. Dicha concentración implica que en 1 Km³ de agua del mar hay 6 Kgs. de oro y si admitimos que el conjunto de océanos y mares tiene un volumen de 1.350 millones de Km³, ello significa que las aguas del mar atesoran algo más de 8.000 millones de Kgs. de oro.

Cierto que los gastos ocasionados por el tratamiento de un Km³ de agua del mar, con el solo objeto de extraer el oro que contiene, serían mayores que el valor del metal precioso contenido. Pero debemos reconocer que la empresa no es imposible, si recordamos que Haber dedicó cuatro años de su actividad investigadora a intentar resolverla y pensamos que más recientemente, la Dow ha reconocido que la fábrica de Wilmington podría producir oro en caso necesario. Aunque se estima que su precio sería cinco veces mayor que el actual en condiciones normales, el avance logrado es extraordinario y probablemente no será el último.

Otros elementos, como el uranio, también pueden ser extraídos del agua del mar, a pesar de su baja concentración.

Por el momento, podemos afirmar que se está desarrollando una intensa actividad investigadora en torno a la separación económica de los componentes minerales del agua del mar y de las aguas salinas, con el fin de contribuir a soportar las cargas económicas de los procesos de desalado.

Así se ha demostrado (9-3) que es posible obtener por cada 4.000 m³ de agua del mar 37 toneladas de fosfato amónico magnésico, de aplicación como fertilizante y que este tratamiento modifica favorablemente la composición de las aguas que hayan de utilizarse en las instalaciones de conversión en agua dulce. El proceso ha sido estudiado por completo durante dos años y se encuentra en la fase de construcción de plantas piloto.

Desde finales de 1962 se está investigando muy activamente la obtención de sales potásicas del agua del mar, por quelación selectiva y precipitación mediante dipicrilamina, en las aguas madres concentradas y frías que quedan como residuo durante los procesos de obtención de agua dulce por congelación del agua del mar.

Se están estudiando procesos que logran la eliminación de los iones K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ y otros, lo que tiene un interés extraordinario en los procesos de conversión, al evitar los problemas de formación de incrustaciones.

Uno de los métodos más completos de aprovechamiento de los productos químicos contenidos en el agua del mar, fue ideado por Zarchin (9-4). Está constituido por cuatro procesos cíclicos que utilizan exclusivamente

cantidades estequiométricas de reactivos, que pueden obtenerse a partir del agua del mar (con excepción de sales de plata que se regeneran) y permiten la obtención de HCl , SO_2 , NaHCO_3 , Mg(OH)_2 y CaSO_4 , dejando un residuo de agua potable utilizable para la irrigación.

Se trata el agua del mar con $\text{Ag}_2(\text{SO}_4)$ que elimina una serie de iones, Cl^- , Br^- , HCO_3^- y BO_2^- en forma de las correspondientes sales de plata. Sometidas éstas a la acción de una mezcla de SO_2 , O_2 y H_2O , a 500-600°C, se regenera el Ag_2SO_4 que se recicla. El filtrado se trata con CaO , separándose el ion Mg^{++} en forma de Mg(OH)_2 , que se separa y calcina a 500-600°C con obtención de MgO y vapor de agua. Queda en la disolución CaSO_4 que se puede precipitar en forma de yeso por acción de CaO y CO_2 . La calcinación del yeso a 1200-1400°C produce CaO y una mezcla de SO_2 , O_2 y H_2O que se utiliza para regenerar el Ag_2SO_4 . El filtrado, que contiene los metales alcalinos, se somete a la acción de MgO y CO_2 en cantidad suficiente para provocar la precipitación de NaHCO_3 . La disolución residual se trata con MgO , dando MgCO_3 que se calcina a 800-1000°, dando MgO y CO_2 , con lo que queda el agua desmineralizada.

El proceso, que fue patentado, reivindica el uso de los sulfatos de Au^+ , Pt^{++} , Hg^+ y Cu^+ para la separación de los iones Cl^- y la substitución del MgO por óxidos de Ca, Ba, Sr, Mn y Fe.

La presencia de los componentes mayores en las aguas de mar o salobres es causa de otro conjunto de fenómenos químicos, que tienen una influencia marcadamente desfavorable sobre los procesos de conversión. Se trata de la formación de productos insolubles, que se precipitan sobre las superficies del equipo industrial y limitan la capacidad de las instalaciones de tal forma, que hacen necesario trabajar en condiciones en que se evite su depósito.

El estudio científico de la precipitación de estos compuestos poco solubles ha permitido determinar las condiciones en que puede trabajarse, durante dilatados períodos de tiempo, sin que formen incrustaciones.

Los factores más importantes a este respecto son: la temperatura, la concentración de las disoluciones y el pH.

En las instalaciones de conversión de aguas salinas los tres compuestos que suelen formar parte de las incrustaciones son el óxido de magnesio, el carbonato de calcio y el sulfato de calcio. La condición necesaria para que precipiten es, naturalmente, que el producto iónico correspondiente supere al producto de solubilidad, aunque esta circunstancia vaya combinada en la práctica con la necesaria presencia de gérmenes de cristalización, que desempeñan un papel decisivo desde un punto de vista cinético.

Los trabajos fundamentales acerca de los límites de estabilidad frente a la precipitación de las disoluciones capaces de formar incrustaciones en los procesos de destilación, son los de Langelier y sus colaboradores (9-5, 9-6),

que condensaron sus observaciones en la construcción de diagramas, en los que se representan las regiones de estabilidad e inestabilidad de las disoluciones con respecto a la precipitación de $Mg(OH)_2$ o $Ca(CO_3)$ en función de las concentraciones de los cationes, el pH y la temperatura. A cada temperatura le corresponde una curva que separa la región de estabilidad de la de precipitación. Langelier introduce el concepto de "índice de saturación"; que es la diferencia entre el pH de una muestra y el pH correspondiente a la saturación (para la misma concentración de iones y alcalinidad total), llamado también índice de Langelier, que da una idea de las condiciones de estabilidad de una determinada disolución.

Según Langelier, el 98% de las incrustaciones están formadas por estos dos compuestos. La precipitación del $Mg(OH)_2$ está íntimamente ligada a las variaciones de pH que se producen durante los procesos de concentración del agua del mar (o de las aguas salobres). El agua de mar suele tener un pH inicial igual a 8, y a 25°C no se encuentra saturada de $Mg(OH)_2$. Cuando se calienta a 70° se descomponen los iones HCO_3^- con formación de iones $CO_3^{=}$ y desprendimiento de CO_2 . Los iones $CO_3^{=}$ provocan por hidrólisis un aumento de la concentración de OH^- , suficiente para que se supere el producto de solubilidad del hidróxido magnésico.

El aumento de concentración de iones $CO_3^{=}$ provoca también la sobresaturación con respecto al $CaCO_3$, producto muy poco soluble en el agua, pero cuya solubilidad aumenta considerablemente en presencia de ácidos, aunque sean muy débiles como el H_2CO_3 .

Como en las proximidades de las superficies de calefacción la temperatura alcanza valores máximos y la solubilidad de CO_2 por consiguiente valores mínimos, el equilibrio de descomposición de los iones HCO_3^- se desplaza hacia la formación de iones $CO_3^{=}$, creándose las condiciones apropiadas para la formación de las incrustaciones.

En cuanto a la precipitación del $CaSO_4$, su mecanismo es diferente y se debe en buena parte a las curvas de solubilidad inversa y a las variaciones de concentración. Cuando el agua del mar se concentra hasta reducirla a dos tercios del volumen inicial, el producto iónico alcanza el valor de producto de solubilidad de la anhidrita, compuesto que no suele precipitar en ausencia de gérmenes. Si se prosigue la evaporación hasta que el volumen de las aguas madres es de un tercio del volumen inicial, se alcanza el producto de solubilidad del hemihidrato del sulfato cálcico y aumenta rápidamente la probabilidad de precipitación del mismo.

Aunque las consideraciones de Langelier se refieren fundamentalmente a los procesos de destilación, las conclusiones generales pueden aplicarse a los demás procedimientos en cuanto provoquen variaciones marcadas de concentración o desplazamiento del pH.

Así, por ejemplo, durante los procesos de electrodialisis, si la densidad de corriente supera a determinados valores, intervienen en los procesos de transporte los iones del agua, H^+ y OH^- , produciéndose modificaciones de pH que sumadas a las variaciones de concentración pueden provocar la formación de incrustaciones sobre las membranas, obturando sus poros, aumentando su resistencia eléctrica y provocando los mismos efectos desfavorables que la disminución del coeficiente de transmisión de calor provoca en los equipos de destilación.

La influencia de las incrustaciones sobre los distintos métodos de desalado es tan grande, que uno de los factores que se tiene en cuenta al enjuiciar la capacidad potencial de los mismos, es justamente el modo de evitar la formación de incrustaciones. Por ejemplo, a las bajas temperaturas usadas por los procesos de congelación o de cristalización de hidratos, la estabilidad frente a los procesos de formación de incrustaciones es mucho mayor que en los procesos de destilación y esto supone una evidente ventaja de los procesos de congelación.

Como al tratar de cada uno de los procesos de desalado indicaremos el papel que en cada uno de ellos desempeña la formación de incrustaciones, nos limitaremos por el momento a señalar cuáles son los métodos generales que se han utilizado para prevenir su formación:

1. De forma general los aparatos y procesos deberán diseñarse de tal modo que no lleguen a producirse disoluciones sobresaturadas de los compuestos que forman incrustaciones. Ello implica trabajar a temperaturas bajas. En los procesos que deban usar temperaturas lo más altas posible, como la destilación, este recurso hace necesario aumentar las dimensiones del equipo y la velocidad de circulación del agua y su turbulencia para evitar el aumento de concentraciones locales en las superficies de transmisión de calor.

2. **ABLANDAMIENTO DE LAS AGUAS.** Es un recurso demasiado costoso, pues las aguas salobres y la del mar son muy duras. Algunas veces, sin embargo, es necesario recurrir a técnicas de canje iónico para reducir la concentración de los cationes divalentes, si es muy elevada, pues de lo contrario las condiciones de operación pueden quedar tan restringidas que el proceso sea imposible.

3. **ADICIÓN DE INHIBIDORES.** Por ejemplo, se ha comprobado que la precipitación del yeso se puede inhibir mediante polifosfatos (9-7). Estos inhibidores tienen campos de temperatura limitados. Así, por encima de $93^{\circ}C$ la adición de polifosfatos da origen a la formación de precipitados abundantes que son tan perjudiciales como las mismas incrustaciones.

4. **CIRCULACIÓN DE UNA PAPILLA DE GÉRMINES CRISTALINOS,** que hacen que la precipitación no se produzca sobre las superficies de transmisión de

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

calor, sino sobre éstos. Una variante es el paso por torres de contacto rellenas del producto formador de las incrustaciones.

Spiegler (9-8) dedica el cuarto capítulo de su obra al estudio de las incrustaciones, acumulando gran cantidad de interesantes datos acerca de este importante aspecto químico de las técnicas de desalado.

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ

NOTAS

- (IX-1) FRANKLAND Y MCKENZIE, *Raw Materials from the Sea*. Constructive Publications Ld. Leicester, England.
- (IX-2) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 51.
- (IX-3) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 52.
- (IX-4) ZARCHIN, *Chemical Abstracts*, 53 (1959), 13523.
- (IX-5) LANGELIER, W. F., *Mechanism and Control of Scale Formation in Sea Water Distillation*, "J. A. W. W. A.", 46 (1954), 461.
- (IX-6) LANGELIER, W. F., CALDWELL, D. H., Y LAWRENCE, W. B., *Scale Control in Sea Water Distillation Equipment*, "Ind. Eng. Chem", 42 (1950), 461.
- (IX-7) BURZIK, E. J., *The inhibition of Gypsum Precipitation by Sodium Poliphosphates*. "Producers Monthly" 19 (1) (1954), 42.
- (IX-8) SPIEGLER, K. S., *Salt Water Purification*, cap. 4, pg. 18-33.

X

MÉTODOS DE DESTILACIÓN

*“Des Menschen Seele
gleich dem Wasser:
Von Himmel kommt es,
zum Himmel steigt es,
und wieder nieder
zur Erde muss es,
ewig wechselnd”*
“Gesang der Geister über den Wassern”

GOETHE

Este eterno cambio de las aguas, subiendo al cielo para volver a caer sobre la Tierra, el descubrimiento de que las lluvias tienen su nacimiento en la evaporación del agua del mar, aparece descrito por vez primera en los escritos de Aristóteles, que sugirió que el agua dulce podría obtenerse por destilación del agua del mar (10-1).

Pero el desarrollo de las técnicas de destilación de agua del mar fue sumamente lento. La primera descripción de su aplicación para atender a las necesidades de las tripulaciones de los barcos es la del capitán Hawkins, que la puso en práctica en 1593, en ruta por los mares del Sur: Escribía: *Aun cuando nos ha faltado agua dulce muchos días..., con una invención que tengo en mi barco he obtenido fácilmente agua dulce del agua del mar, en cantidades suficientes para mantener mi gente..., agua destilada, sana y nutritiva.*

Pero aún en 1791, Jefferson recomienda que enseñe a los marinos el conocimiento de la destilación del agua del mar y aunque parezca extraño no se acepta su recomendación y los barcos tienen que transportar su agua dulce.

Hay que esperar hasta 1884 para que se inicie la producción de destiladores Weir para atender a las necesidades de agua en los barcos, y a 1912

para que aparezca la primera instalación terrestre de destilación de agua en cantidades industriales.

El desarrollo de la industria del petróleo dio un extraordinario impulso a la destilación de aguas salinas entre 1930 y 1935.

La última contienda mundial fue la primera ocasión en que las unidades que operaron en el desierto tuvieron que obtener su agua dulce *in situ* y en que se tuvo que utilizar el desalado del agua del mar en pleno océano, para atender a las necesidades de los naufragos.

Hoy en día las noticias del establecimiento de instalaciones de destilación de agua del mar en cantidades industriales son cada vez más frecuentes. Así, en "Chemical and Engineering News" del pasado 10 de junio se da la noticia de la construcción de una de dichas instalaciones, para atender a las necesidades de una fábrica de cemento en las Bahamas, al tiempo que se anuncia la inauguración de la mayor instalación del mundo de destilación con compresión de vapor y circulación forzada en Roswell, como parte del conjunto de estaciones experimentales del OSW, destinado a obtener datos reales correspondientes a la economía de los distintos procedimientos de desalado de aguas salinas.

Se ha estimado (10-2) que el 95% del agua desmineralizada que se obtiene en el mundo a partir de aguas salinas se fabrica por destilación y datos más recientes (10-1) dan una capacidad de 80 millones de litros/día para las instalaciones de destilación de aguas salinas, que en número de dieciséis funcionan en todo el mundo.

Como ya hemos indicado anteriormente, la posibilidad de establecer simbiosis con los procesos de obtención de energía eléctrica (10-3), particularmente mediante aplicación de los reactores nucleares (10-4), da a los procesos de destilación perspectivas de un rápido desarrollo.

Los hechos han venido a demostrar que, aun cuando el precio del agua obtenida por destilación sigue siendo muy alto con respecto al de las aguas dulces naturales, este proceso brinda la posibilidad de situar fábricas y desarrollar fuentes de riqueza a orilla del mar, si su localización se considera deseable, en parajes en que haya una carencia total de posibilidades de suministro de agua dulce (10-5).

La causa del elevado precio del agua dulce, obtenida por destilación, ha de buscarse en el elevado consumo de energía, impuesto por el calor latente de vaporización en las instalaciones de efecto simple, incrementado por la imposibilidad de utilizar procesos reversibles.

La magnitud del consumo de combustibles para destilar el agua del mar es impresionante. Aun aprovechando totalmente la energía térmica, por cada 20 toneladas de agua dulce habría que consumir una de fuel-oil y si se utilizara energía eléctrica, mediante calefacción con resistencias, el gasto

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

producido llegará a ser seiscientos veces el correspondiente al valor de la energía mínima termodinámicamente necesaria para llegar a destilar el agua del mar reduciendo su volumen a la mitad (10-6), suponiendo que se utilizan aparatos de destilación directa o de efecto simple.

Los destiladores de efecto simple son así completamente antieconómicos, pues sólo el precio de la energía gastada es muy alto (del orden de 170 pesetas/m³).

Por ello, todos los aparatos de efecto simple se usan exclusivamente cuando la cantidad de agua a obtener es lo suficientemente pequeña para que su precio sea soportable (destiladores de laboratorio), o bien cuando es necesario recurrir a instalaciones de volumen reducido (como los destiladores Kleinschmidt usados durante la segunda guerra mundial) o se dispone de vapor a muy bajo precio, como en las instalaciones de los barcos en que se usa el vapor de escape de las turbinas.

En todos los demás casos es necesario recurrir a la destilación de efectos múltiples, que permite reducir el consumo de energía por unidad de peso de agua obtenida a un nivel tan bajo, como pueda alcanzarse con cualquier otro método, lo que unido al bajo precio de la energía térmica, en comparación con las demás formas de energía, confiere a la destilación una posición bastante favorable.

Pero toda reducción del consumo específico de energía tiene inevitables repercusiones económicas, deducidas del necesario aumento de dimensiones de las instalaciones, por lo cual los procesos de destilación quedan sometidos al clásico cálculo de las características que conduzcan al precio óptimo, que es función del costo relativo de la energía invertida y el equipo utilizado.

Ello explica que se hayan desarrollado diversas soluciones para el problema de la destilación industrial de aguas salinas, entre las cuales estudiaremos algunas de las que han alcanzado mayor importancia.

Silver (10-1), que ha sometido a estudio los caracteres generales de los procesos de destilación de aguas salinas, indica que, al haberse logrado reducir el consumo específico de energía a niveles tan bajos como se desee mediante los sistemas de efectos múltiples, y al poder utilizar energía térmica, que es la forma más barata de energía, en los procesos de destilación, los factores más importantes en la determinación del precio del agua dulce son el capital invertido y los gastos de operación asociados a un determinado consumo específico de energía. Por ello lo más importante es el sistema de regeneración, las dimensiones de las superficies de transmisión de calor, la cantidad y clase de materiales utilizados en la instalación y los gastos de operación y conservación del equipo.

Salvo el sistema de evaporadores con compresión de vapor, que tomó gran auge durante la segunda guerra mundial en unidades pequeñas y cuyas posibilidades para la destilación de aguas salobres se estudiarán mediante la instalación experimental de Roswell, todos los demás que se han utilizado en gran escala son alimentados mediante energía térmica y pertenecen a dos tipos fundamentales. El primero se caracteriza porque el agua salina se calienta hasta la temperatura necesaria para que hierva. El segundo separa la operación de transmisión de calor y la evaporación, impidiendo que el agua hierva al calentarla mediante una presión suficiente que después se disminuye bruscamente, con lo cual se produce la destilación "relámpago".

Las primeras instalaciones de destilación del agua del mar utilizaron evaporadores de tubos sumergidos, en los que el vapor de calefacción circula a través de tubos introducidos en el agua de mar, la cual se calienta hasta temperaturas suficientemente altas para que hierva. Las características de este tipo de instalaciones y los problemas que se presentan durante su funcionamiento pueden estudiarse, por ejemplo, en el trabajo de A. Bruce *Five Years of Experience with Desalinization at Morro Bay* (10-7). La instalación descrita fue la primera que se construyó en Estados Unidos en 1953, época en que el sistema de tubos sumergidos era el único que había sido usado durante un tiempo suficiente para demostrar su capacidad para resolver el problema de destilación de aguas salinas.

Posteriormente se han utilizado otros tipos de evaporadores como el denominado L. T. V. (grandes tubos verticales), en los que la energía térmica se aplica mediante vapor, que rodea a un conjunto de tubos verticales por los que circula el agua salada sometida a convección forzada, o los sistemas de evaporación relámpago con efectos múltiples, que según Silver, son los que ofrecen mejores perspectivas actualmente.

Todos estos procedimientos brindan soluciones diferentes a los problemas específicos que plantea la destilación en gran escala de aguas salinas.

En gran parte estos problemas nacen como consecuencia de la presencia en las aguas salinas de iones capaces de formar incrustaciones sobre las superficies de transmisión de calor. La primera consecuencia es la imposibilidad de utilizar la calefacción directa de los evaporadores, ya que a altas temperaturas el sistema quedará dentro de las zonas de inestabilidad de los diagramas de Langelier.

Por ello el aporte de energía térmica tendrá que realizarse mediante vapor de agua, que al condensarse cederá al agua salina el calor latente de vaporización. Mediante el sistema de efectos múltiples se logrará teóricamente que por cada Kg. de vapor condensado se produzca un número n de Kg. de destilado, igual al número de efectos (aunque las pérdidas inevitables reducirán el rendimiento en la práctica), pero en todo caso tendrán que uti-

lizarse superficies sólidas, buenas transmisoras del calor, que separen el vapor de agua que se condensa de la disolución que hierve o se calienta.

Ello tendrá como consecuencia la formación de un sistema de capas sucesivas, que actuarán como otras tantas resistencias térmicas en serie, que se opondrán a la transmisión del calor. Para reducir al mínimo estas resistencias térmicas, tendrá que utilizarse la circulación forzada del agua salina, que disminuirá el espesor de la capa estacionaria y evitará el riesgo de la formación de incrustaciones. Se tendrán que poner en práctica los procedimientos más adecuados en cada caso para impedir la formación de incrustaciones, con la consiguiente repercusión sobre el campo de temperaturas utilizables y sobre la elección de los materiales de construcción de los evaporadores, si, por ejemplo, se utilizasen los tratamientos químicos de acidificación para impedir la precipitación del $Mg(OH)_2$ o del $CaCO_3$. Por otra parte se habrán de estudiar los procesos de condensación del vapor, para evitar la formación de capas líquidas continuas sobre la superficie metálica, que deberá quedar recubierta de agentes antihumectantes que originen la condensación en forma de gotas discontinuas (10-8).

Todos estos campos —incremento de las temperaturas de trabajo, eliminación de la formación de incrustaciones, selección de los materiales de construcción para los evaporadores en función de los problemas de corrosión y uso de agentes de condensación del vapor en gotas— constituyen dominios sometidos a intensa investigación (10-9).

Como solución ideal a todos estos problemas, ha sido considerada la utilización de fluidos, totalmente inmiscibles con el agua, como agentes de transmisión de calor, lo cual permitiría eludir el uso de superficies sólidas de transmisión de calor, tal como fue propuesto por Woodward (10-10). Sin embargo, aún no se han resuelto las dificultades que plantea el encontrar una substancia que pueda actuar de esta forma, sin comunicar al agua destilada olor, sabor ni toxicidad.

También se ha tratado de eludir los problemas que plantea la transmisión de calor a través de superficies sólidas, mediante procesos que utilizan la técnica de lecho fluidizado, puestos a punto por el Batelle Memorial Institute. El agua del mar calentada por vapor condensante, se pulveriza sobre un lecho fluidizado de partículas de sal. La evaporación tiene lugar en la superficie de las partículas y el vapor producido se comprime. Se separa la sal continuamente del lecho fluidizado. No se producen aguas madres residuales y probablemente no se formarán incrustaciones, ya que la evaporación tiene lugar en contacto con la superficie de las partículas que forman el lecho fluidizado. Las superficies de transmisión de calor se ponen en contacto con la sal seca (10-11).

MÉTODOS DE DESTILACIÓN APLICADOS A LAS AGUAS SALINAS

Descartada la destilación simple, como proceso para la obtención de grandes cantidades de agua dulce a partir de aguas salinas, han sido sometidos a ensayo y utilizados aquellos tipos de destiladores de múltiples efectos de gran capacidad que ya anteriormente hemos mencionado.

Una de las grandes ventajas de la evaporación con efectos múltiples es su capacidad para operar consumiendo vapor a baja temperatura, lo que permite utilizar el vapor usado, procedente de instalaciones de obtención de energía eléctrica o de fábricas de productos químicos. No es accidental que las mayores instalaciones de destilación de agua del mar que funcionan en el mundo, como las de Kuwait o Aruba, hayan sido diseñadas para utilizar vapor previamente aprovechado en la obtención de energía eléctrica (10-12).

En todas las instalaciones de efectos múltiples, la determinación del número óptimo de efectos constituye un ejemplo del típico problema económico de determinación de las condiciones más favorables, en función de los gastos relativos correspondientes al consumo de energía y a las cargas fijas debidas a la instalación.

Un análisis muy simplificado sería el siguiente: Teniendo en cuenta que el consumo de energía por unidad de producto obtenido será tanto menor cuanto mayor sea el número de efectos y que las cargas fijas (interés del capital invertido, impuestos, depreciación, reparaciones, amortización) será proporcional al número de efectos, se podrá establecer la relación (10-13):

$$C = A \cdot n + \frac{S}{n}$$

en que C representa el gasto por unidad de volumen de agua dulce producida, A es una constante de proporcionalidad, n el número de efectos y S el gasto por unidad de volumen de agua obtenida con una instalación del mismo tipo, pero de un solo efecto.

La condición que reduce C a un mínimo es $n = \frac{S}{A}$

Es decir, que el número óptimo de efectos no es el máximo número que pueda establecerse en el intervalo de temperaturas de que se disponga, a base de intercalar gradientes de temperatura en cada efecto que aseguren una velocidad de flujo de calor razonable, sino un número mucho menor, lo cual

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

es lógico puesto que el capital invertido en la instalación crece extraordinariamente cuando el número de efectos se hace muy grande (lo que por otra parte permite aproximarse más a las condiciones de reversibilidad y disminuir el consumo específico de energía). Y así, la instalación de Aruba tiene solamente seis efectos, en lugar del gran número que podrían establecerse.

Una vez determinado el número de efectos es necesario escoger un sistema de evaporación de suficiente rendimiento. Silver (10-1) indica que los sistemas que han sido utilizados son el de LTV y el de evaporación relámpago con múltiples efectos, indicando la existencia de ciertas dificultades termodinámicas y prácticas, que impiden la aplicación de otros sistemas, como el de evaporadores con tubos sumergidos o los sistemas con compresión de vapor, cuando se trate de destilar grandes cantidades de aguas saladas. Sin embargo, ya hemos mencionado cómo el método de compresión de vapor se ha aplicado en Roswell con una capacidad diaria de cerca de 4.000 m³.

El proceso de LTV, cuyo esquema y descripción pueden consultarse en un artículo de Guccione (10-14), utiliza los evaporadores que habían resultado más atractivos de todos los ideados por la ingeniería química, por ofrecer la forma más económica de área de transmisión de calor por cantidad de energía térmica consumida y capital invertido. Su estudio práctico se realiza en una instalación experimental del OSW en Freeport que funciona desde 1961. Un reciente informe (10-11) da una idea de las dificultades con que ha tropezado para conseguir la producción proyectada de 4.000 m³/día. Aun aumentando la temperatura máxima de trabajo, no se ha logrado mantener el rendimiento previsto, como consecuencia de la formación de incrustaciones en los intercambiadores de calor y en los evaporadores. La instalación ha permitido estudiar experimentalmente el comportamiento frente a la corrosión de diferentes materiales metálicos, tales como el bronce de aluminio y otras aleaciones y la eficacia de diversos sistemas de lucha contra la formación de incrustaciones, tales como la inyección de ácidos (para mantener un pH aproximado a 6), o la siembra de papillas de gérmenes de cristalización en las aguas tratadas, para evitar el depósito de las sales insolubles sobre el equipo de evaporación.

Aun cuando no se dispone de los datos económicos correspondientes a los gastos ocasionados por el mantenimiento de esta estación experimental, las normas del OSW (10-15) permiten hacer un cálculo del precio del agua obtenida y establecer extrapolaciones para la variación del precio si se aumenta la escala de la instalación.

Para la instalación de Freeport se admite un precio de 1,46 \$ por 1.000 g. (unas 23 pts./m³).

En la evaporación relámpago con múltiples efectos, el agua del mar se calienta a presión sin que llegue a hervir y sólo después se deja pasar a una serie de cámaras de expansión, usando el vapor de cada efecto para calentar el agua en el siguiente y provocando en cada cámara la evaporación brusca mediante progresivas disminuciones de presión.

Las razones del mejor rendimiento de este procedimiento para la conversión del agua del mar fueron expuestas por Frankel (10-16) y han sido detalladas por Silver (10-1), que establece que este método se ha convertido en la actualidad en el más importante de los métodos de destilación. El sistema permite aproximarse mucho más que otros a las condiciones de reversibilidad (es decir, de consumo mínimo de energía) por razones que ya fueron expuestas por Tribus (10-17).

También en este caso el primer problema que retrasó el desarrollo del equipo adecuado fue la formación de incrustaciones sobre las superficies de transmisión de calor. Silver admite que la formación de incrustaciones impide utilizar temperaturas máximas del orden de 120°C que serían muy deseables como remedio para disminuir el precio del agua convertida. En cuanto la temperatura pasa de 93°C los inhibidores de la incrustación son ineficaces. Por otra parte, si se trata de impedir la formación de incrustaciones mediante adición de ácidos al agua del mar, el precio de la instalación aumenta extraordinariamente al tener que utilizar materiales resistentes a la corrosión en estas condiciones.

Además de los problemas de transmisión de calor, estas instalaciones presentan delicados problemas de transporte de materiales. Se ha de tener en cuenta que para lograr una producción diaria de 4.500 m³ han de circular a través de los destiladores 2.000 m³/hora de agua salada. Después de pasar por los calefactores, este volumen de agua ha de entrar en la primera cámara de evaporación donde se evapora una pequeña fracción al hacer el vacío, pasando la mayor parte del agua a la segunda cámara donde se repite el proceso, que continúa de la misma forma hasta 40 veces. Los problemas de diseño para lograr una perfecta regularidad de la circulación son extraordinarios. Pueden consultarse más detalles en (10-1). Se dispone de los datos experimentales correspondientes a gran número de instalaciones que funcionan en todo el mundo. Se consideran típicos los de la instalación experimental del OSW en San Diego, construída para una producción de unos 4.000 m³/día y que está funcionando desde comienzos de 1962.

La instalación ha tropezado con dificultades de operación causadas por el suministro de agua del mar libre de algas. En un período de seis meses tuvo que interrumpir su funcionamiento veintidós veces por esta causa, que constituye la mayor dificultad.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Fue construída para aprovechar la energía del reactor nuclear de San Diego. Por tratarse de un reactor de tipo experimental hubo de obtener su energía mediante consumo de fuel-oil. El precio del agua obtenida, estimado de acuerdo con las especificaciones del OSW, es de 1,30 \$ los 1.000 g. (unas 21 pts./m³).

En las instalaciones de destilación con compresión de vapor, en lugar de aprovechar vapor procedente de una fuente externa como fuente de energía, se utiliza el "propio vapor", por lo que el sistema era conocido desde hace muchos años como el mejor método autónomo y compacto para la destilación de aguas saladas. El método presenta la ventaja de que con un solo evaporador se puede lograr la misma economía energética que con un sistema de 15 a 20 efectos, con la consiguiente reducción en el capital invertido, aunque esta ventaja quede reducida en parte por la necesidad de utilizar un compresor.

Los siguientes datos tomados de la obra de Spiegler (10-18), basados en los trabajos fundamentales de Latham (10-19), permiten formarse una clara idea del funcionamiento de estos destiladores.

Se concentra el agua del mar hasta que su volumen queda reducido a la mitad, con lo que su temperatura de ebullición asciende a 101°C a una atmósfera de presión. El agua del mar se supone a 15°C y mediante intercambiadores de calor, por los que circula en contracorriente con el agua dulce y las salmueras que quedan como residuo de la evaporación, se calienta hasta 97°C y penetra en el evaporador. El vapor procedente de la ebullición a presión atmosférica (que se inicia mediante un calefactor auxiliar) se comprime mediante un compresor hasta 1,2 atmósferas, con lo que su temperatura aumenta hasta 105°, y así crea el gradiente necesario para que, al pasar a través del conjunto de tubos del evaporador que contienen el agua del mar, les ceda el calor latente, provocando su ebullición al tiempo que se condensa dando agua dulce.

La energía que se consume en este proceso es energía mecánica o eléctrica y el consumo aumenta linealmente con la temperatura de condensación del vapor. Por ello es conveniente que el vapor se condense a temperaturas lo más bajas que sea posible, si se quiere reducir a un mínimo el consumo de energía de compresión. Pero entonces la velocidad de transmisión de calor se hace menor y se tiene que aumentar la superficie de los tubos, es decir, las dimensiones del evaporador, con lo cual crece la inversión de capital. Nuevamente nos encontramos ante el problema típico del aumento de la inversión de capital, correspondiente a la disminución del consumo de energía, que ha de resolverse buscando las condiciones económicas óptimas.

Este sistema se ha usado ampliamente en unidades de destilación pequeñas del orden de 80 m³/día, quedando impuesto el límite máximo por

las dimensiones del compresor (10-20). Sin embargo, se ha iniciado su estudio en escala mayor (10-21).

También en este caso las dificultades a vencer nacen del hecho de que las aguas de Roswell (que son aguas salobres) son más duras que el agua del mar y particularmente ricas en sulfatos, presentando grandes problemas de formación de incrustaciones. Por otra parte, las dificultades de eliminación de las aguas residuales, cuyo volumen debe reducirse todo lo que sea posible, hacen que se agudice el problema de la formación de incrustaciones. Se cree que si la instalación de Roswell logra extraer agua dulce en condiciones económicas, el proceso será aplicable prácticamente a todas las aguas salinas.

Los datos que hemos mencionado acerca de los precios del agua convertida dan valores muy altos con respecto a los que hoy rigen en el mercado. En todos los casos, por extrapolación se ha calculado que aumentando de ocho a diez veces las dimensiones de las instalaciones experimentales, el precio se podría reducir casi a la mitad.

Aunque estos precios son los correspondientes a la conversión exclusivamente y no tienen en cuenta los gastos de distribución, son muchos los autores (10-22) que opinan que aun con los precios actuales se producirá una gran demanda de estas instalaciones.

Dodge (10-23), reconociendo que estos precios son demasiado elevados, admite que es confortador saber que en la actualidad se puede contar con un suministro prácticamente inagotable de agua dulce, al que podemos dirigirnos cuando surja la necesidad, aun a costa de pagar un precio que siendo mayor que el actual no será prohibitivo para muchas aplicaciones.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

NOTAS

- (X-1) SILVER, R. S., *A review of distillation processes for fresh water production from the sea*, "Dechema Monographien", Bd. 47, 43.
- (X-2) DODGE Y ESHAYA, *Large-scale demineralization of sea and brackish water*, "British Chemical Engineering", nov. 1959, pg. 596.
- (X-3) D. M. BRADT, J. A. W. W. A, 52 (1960), 574.
- (X-4) HAMMOND, R. P., *Nucleonics*, 20 (12) (1962), 45.
- (X-5) A. W. BRUCE, *Five Years of Experience with Desalination at Morro Bay*, J. A. W. W. A., 53 (1961), 11.
- (X-6) SPIEGLER, K. S., *Salt Water Purification*, cap. 5.
- (X-7) A. W. BRUCE, ver (10-5).
- (X-8) OSMENT, B. D. J., *Promoters for the dropwise condensation of steam*, "Dechema Monographien", Bd. 47, pg. 145.
- (X-9) GILLAM, W. S. MC CUTCHAM, J. W., *Science*, 134 (1961), 1041.
- (X-10) *Chem. Eng. Progr.*, 57 (1961), 52.
- (X-11) *Chem. Eng. News*, 41 (1963), 48.
- (X-12) MINKEN, J. W., *Profits obtainable on combining power generation with various methods of saline water conversion*, "Dechema Monographien", 47, pg. 287.
- (X-13) SPIEGLER, K. S., l. c.
- (X-14) GUCCIONE, *Chem. Eng.* 26 nov. 1962.
- (X-15) *A Standardized Procedure for Estimating Costs of Saline-Water Conversion*, OSW, Washington D. C. 1956.
- (X-16) FRANKEL, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, London, 174, n.º 7 (1960).
- (X-17) TRIBUS, M., *Thermodynamic and Economic Considerations in the Preparation of Fresh Water from the Sea*, University of California, Department of Engineering Rep. 59-34-1960.
- (X-18) SPIEGLER, K. S., l. c.
- (X-19) LATHAM, A., *Compression Distillation*, "Mech. Engr." 68 (nº 3) (1946), 221.
- (X-20) *Forced Circulation Vapor Compression Distillation for Desalination of Water*, Lobeis, E. H., Pechenik, "ASME Process Industries Div. Conference Houston", 1961.
- (X-21) *Chem. Eng.*, 69 (1962), 74.
- (X-22) DODGE, *Am. Scientist*, 48 (1960), 476.

XI

DESTILACIÓN SOLAR

*All in a hot and copper sky,
The bloody Sun, at noon,
Right up above the mast did stand
Not bigger than the Moon.*
The Rime of the Ancient Mariner

COLERIDGE

Los problemas de aprovechamiento directo de la energía solar se vienen estudiando con extraordinario interés desde hace mucho tiempo, dado el carácter prácticamente inagotable de la misma y su precio nulo.

Pero sus características peculiares, en particular su dilución y discontinuidad, hacen que su aplicación a procesos industriales tropiece con extraordinarias dificultades.

Cierto que cada vez se estudian con más intensidad los fenómenos de fotosíntesis, la pila solar y de pigmentos orgánicos, la concentración de la energía solar mediante colectores capaces de alimentar motores de potencia reducida y la aplicación a la obtención de altas temperaturas en los hornos solares, pero por el momento todos estos sistemas implican gastos tan elevados, que el aprovechamiento de la energía solar para la obtención de agua dulce a partir de aguas salinas, sigue líneas sencillas de aprovechamiento directo.

M. Telkes (11-1) nos da una rápida visión del desarrollo histórico de la destilación solar. Menciona cómo ya Lavoisier usó lentes para concentrar la energía solar en 1770, con complicados montajes. El aprovechamiento de la energía solar se estudia en obras tales como las de Mouchot, *La chaleur solaire et ses applications industrielles* (1869), o la de Kausch, *Die unmittelbare Ausnutzung der Sonnenenergie* (1920) y entre los dispositivos más eficaces habría que contar con el de Abbot, (U. S. Patent 2.141.330 (27 diciem-

bre 1938), que mediante un reflector parabólico movido mediante un aparato de relojería, consigue aprovechar hasta el 80% de la energía incidente sobre el mismo.

Pero es evidente que por elevado que sea el rendimiento de estos aparatos, no pueden aprovechar más energía que la que incide sobre el colector, que no puede ser grande, y el costo inicial del reflector y del dispositivo que le permite seguir el movimiento del Sol, impide pensar en la aplicación de estos sistemas a la producción de agua dulce en grandes cantidades.

Por ello se han desarrollado más los destiladores solares estacionarios, entre los que desempeña un papel histórico fundamental el construido en 1872 en Las Salinas (Chile), que se mantuvo en funcionamiento continuo hasta 1908 con una producción algo superior a los 20 m³ diarios y una superficie cubierta de 47.000 m².

Otros precedentes y bibliografía sobre la destilación solar pueden consultarse en los trabajos de Lóf (11-2, 3, 4), que contienen abundantes datos experimentales.

Los destiladores solares pueden ser de diversos tipos, pero los que han sido más estudiados están constituidos por cubetas horizontales, más o menos profundas, que actúan como caldera y están cubiertas por superficies transparentes, de vidrio o plástico, que cierran herméticamente y adoptan la forma de placas inclinadas. Actúan como condensador refrigerado por el aire ambiente. El vapor producido por la acción del sol se condensa en la superficie interna de la cubierta transparente y se recoge mediante canales situados bajo el borde inferior de las placas de condensación. En unos tipos la capa de agua es poco profunda (2,5 cm.) y un fondo metálico ennegrecido absorbe la energía solar. En otros, la capa es más profunda (25-30 cm.) y la masa de agua es suficiente para que la absorción de la energía solar tenga lugar directamente.

Los caracteres generales, ventajas y desventajas de estas instalaciones, han sido enumeradas en un informe reciente (11-5), destacando como cualidades ventajosas:

a) La eliminación de fuentes energéticas artificiales, que hace que este método sea particularmente atractivo en zonas áridas, de fuerte insolación, en las que no se disponga de combustibles baratos, aunque debemos subrayar que las unidades pequeñas están siendo utilizadas en competencia con otros sistemas, aun en regiones en que se dispone de dichos combustibles.

b) El aprovechamiento de materiales de construcción de tipo económico, que hace que los evaporadores sean de precio menor que los aparatos de evaporación tradicionales. En este aspecto es interesante la introducción de los materiales plásticos (11-7), como substitutos de las cubiertas de vidrio

y particularmente las unidades con plásticos inflados, del tipo del Teslar y Mylar.

c) La simplicidad de diseño en las unidades carentes de partes móviles (ya hemos indicado que cualquier intento de modificación de las unidades de captación para que sigan la marcha de los rayos solares, o dispongan de colectores para concentrar la energía solar mediante lentes o reflectores, quedan completamente fuera de lugar para las instalaciones grandes por evidentes razones económicas). Sin embargo, se han construido evaporadores con la superficie de evaporación inclinada, que permiten un aprovechamiento mejor de la energía solar.

d) La facilidad de construcción al no exigir mano de obra especializada.

e) El no requerir tratamiento previo de las aguas, ya que la temperatura máxima se mantiene moderada (aproximada a 50°C), con desaparición de buena parte del peligro de formación de incrustaciones, particularmente en los evaporadores de cubetas profundas en las que el agua absorbe directamente la radiación solar. En los evaporadores de cubetas poco profundas, en las que es necesaria una superficie ennegrecida para la captación de las radiaciones, es posible, según Morlon (11-8), la formación de incrustaciones calcáreas blancas sobre dichas superficies. También se debe tener presente, como desventaja de las cubetas profundas, la posibilidad del crecimiento de algas cuando se utilizan aguas salobres, inconveniente que no se ha observado si se usa agua del mar.

f) También constituye una ventaja la simplicidad de los cálculos de aumento del tamaño de escala. A diferencia de lo que sucede con otros tipos de instalación, en los evaporadores solares las unidades grandes no son más que múltiplos simples de las unidades pequeñas.

Frente a todas estas características ventajosas surgen inconvenientes que son muy difíciles de superar y que nacen:

a) De la naturaleza difusa de la energía solar, que impone que, cuando se trate de conseguir producciones elevadas de agua dulce, se tengan que recubrir superficies tan grandes que el capital invertido impide que el precio del agua obtenida pueda entrar en competencia con el de otras instalaciones que usan energía más concentrada.

b) El carácter discontinuo de la energía solar, que hace que sea imposible acoplar las unidades de captación de energía con los dispositivos tradicionales de evaporación (dado el tiempo en que éstos tendrían que permanecer inactivos), a la vez que obliga a aumentar la inversión de capital para lograr una producción determinada.

c) La vulnerabilidad frente a los agentes atmosféricos, que crea un riesgo permanente frente a las tormentas, granizo, vendavales, e implica el uso de materiales resistentes a estos fenómenos; y

d) Su inaplicabilidad en zonas de poca insolación.

Aparte de estas consideraciones de carácter general, conviene que hagamos otras de tipo más cuantitativo, para que puedan apreciarse con más facilidad las posibilidades de este método. Utilizaremos datos recopilados particularmente por Spiegler (11-9).

Los evaporadores solares de tipo horizontal captan una cantidad de energía que oscila entre 239 y 551 cal cm⁻² día⁻¹, según la latitud, lo que con un aprovechamiento del 50% (que es el rendimiento práctico de las instalaciones según Löff) es capaz de producir evaporaciones que hacen descender el nivel del agua en las cubetas entre 0,2 y 0,5 cm. por día, aproximadamente. Si los evaporadores tienen inclinada la superficie de captación de energía, se calcula un incremento en la captura de radiación, que es de un 5 a un 10% en verano y más del doble en invierno.

Todo ello hace que los distintos autores evalúen la producción en unos 4 litros/metro cuadrado y día (11-8), aunque en general se admiten rendimientos medios de 3,5 litros/m² día.

Teniendo en cuenta estas capacidades de producción, un cálculo simple nos llevaría a la conclusión de que una instalación que tuviese una superficie cubierta de 1 Km² (que con las instalaciones auxiliares llegará a ser de 1,3 Km²) permitiría obtener 1,24 millones de metros cúbicos por año. En este Km² se evaporaría una capa de 1,24 m. de profundidad. Si se evalúan las necesidades de agua de riego en 60 cm. de lluvia, la instalación proporcionaría agua suficiente para regar 2 Km². Spiegler menciona cálculos análogos a éste, referidos a las condiciones de Argelia y África del Norte, con una producción de 1,7 millones de m³/Km² año, y Fischbeck (11-10) indica que en cualquier aplicación de tipo agrícola debería dedicarse a la instalación de evaporación una cuarta parte por lo menos del terreno cultivado.

Resulta extraordinariamente difícil establecer previsiones de confianza acerca del precio a que puede obtenerse el agua por destilación solar, pues en general no se han construido instalaciones grandes y no han sido establecidos perfectamente los gastos ocasionados por los distintos tipos de evaporadores sometidos a ensayo. Se cuenta con poder aplicar el principio de los múltiples efectos, que ha sido ya utilizado en una unidad experimental de la Universidad de Arizona (11-11), basado en un proceso perfeccionado que separa la captación de energía, la evaporación de las aguas salinas y la condensación del vapor producido. También es posible una reducción del capital invertido al utilizar unidades compactas de materiales plásticos.

Con todo, Löff establece, como estimaciones poco precisas sobre precios, cifras del orden de 1,8 \$ por 1.000 g. (unas 30 pts./m³), que son superiores a las que se han logrado mediante otros procesos de destilación. Sin embargo, se considera que la situación puede modificarse, llegando a un terreno

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

en que el método sea de competencia con los otros métodos de conversión, aunque desde luego y salvo circunstancias excepcionales, el precio es inadecuado para aplicaciones agrícolas.

Los datos más recientes (11-11) indican que dada la inversión de capital, las unidades de dimensiones reducidas son aplicables con buenas posibilidades aun en áreas en que se disponga de combustibles de bajo precio, adaptándolas a las necesidades domésticas y pequeñas instalaciones comerciales. En cambio parecen poco razonables las instalaciones que hubieran de producir cantidades superiores a 200-400 m³/día.

JOSÉ BELTRÁN MARTÍNEZ

NOTAS

- (XI-1) TELKES, M., *Fresh Water from Sea Water by Solar Distillation*, "Ind. Eng. Chem.", 45 (1953), 1108.
- (XI-2) LÖF, G. O. G., *Demineralization of Saline Water with Solar Energy*, U. S. Department of the Interior, OSW, Research and Development Progress Report, n.º 4, 1954.
- (XI-3) LÖF, G. O. G., *Design and Operating Principles in Solar Distillation Basins*, Saline Water Conversion, Advances in Chemistry Series, 27 (1960), 156.
- (XI-4) LÖF, G. O. G., *Solar Distillation*, J. A. W. W. A., 52, 5 (1960), 578.
- (XI-5) *Progress in Saline Water Conversion*, Task Group Report, J. A. W. W. A., 53 (1961), 1.100.
- (XI-6) ANÓN. *Chem and Eng. News*, 41 (1963), 48.
- (XI-7) BLOEMER, J. W., COLLINS, R. A., Y EIBLING, J. A., *Field Evaluation of Solar Sea Water Stills*, Saline Water Conversion, Advances in Chemistry Series, 27 (1960), 166 (American Chemical Society).
- (XI-8) MORLON, CL., *Sciences et Avenir*, 197 (1963), 491.
- (XI-9) SPIEGLER, *Salt Water Purification*, pg. 71.
- (XI-10) FISCHBECK, *Chimie et Industrie*, 79 (1958), 563.
- (XI-11) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 48.

XII

CONGELACIÓN

*Freeze, freeze, thou bitter sky
That dost not bite so nigh
As benefits forgot:
Though thou the waters warp,
Thy sting is not so sharp
As friend remember'd not.*

SHAKESPEARE

La conversación del agua salada en agua dulce por congelación es un proceso natural que tiene lugar constantemente y que, en escala reducida, ha sido utilizado en las zonas frías de Asia central, Siberia y costas del mar Aral, como fuente de agua dulce.

Es bien conocido el hecho de que las sales disueltas hacen descender el punto de congelación del agua. Para el agua del mar el punto de congelación suele estar comprendido entre $-1,8$ y -2°C y desciende hasta $-3,8^{\circ}\text{C}$ cuando la concentración de sales ha llegado a duplicarse como consecuencia de la separación de cristales de hielo.

Los cristales de hielo que se separan crecen muy rápidamente y tienen típicamente la forma de laminillas delgadas con un espesor de 0,1 a 0,4 mm., entrelazándose para dar una estructura porosa, semejante a la de la nieve. Las condiciones de la cristalización suelen ser tales que, precisamente en la inmediata proximidad de los cristales de hielo, la concentración de las sales se hace mucho mayor que la concentración media y la consecuencia es el crecimiento irregular de los cristales de hielo, que llegan a ocluir en el transcurso de su crecimiento, aguas madres concentradas rebeldes a todo intento de congelación a las temperaturas de trabajo.

La obtención de bloques compactos de hielo, a velocidades compatibles con los procesos de tipo industrial, es completamente imposible.

Como indica Fischbeck (12-1), ante una superficie plana de hielo en proceso de crecimiento, a través de la cual se sustrae calor, se produce la cristalización del agua y un enriquecimiento en sales causado por la acumulación de los iones no aceptados en el retículo cristalino. Las sales tienen que difundirse hacia la disolución y se crea un gradiente de concentración que va acompañado de disminuciones de la temperatura de congelación, hasta una temperatura tanto más baja cuanto más rápido sea el crecimiento de la capa de hielo. De esta forma se produce, además del gradiente de concentraciones, un gradiente de temperaturas. Si las temperaturas locales efectivas son más bajas que las necesarias para la formación de cristales, las agujas que se forman siguen creciendo. La superficie plana del hielo resulta lábil.

Tamman y su escuela (11-2) dedicaron mucho esfuerzo al estudio de la cristalización del hielo con formación de estructuras dendríticas de aspecto de plumas.

La consecuencia de todo este mecanismo cinético, en que intervienen como variables fundamentales la velocidad de nucleación y la de crecimiento de los cristales, es que si se somete a un proceso de congelación parcial el agua del mar en el laboratorio, y, una vez separada la papilla cristalina de las aguas madres, se funde de nuevo, la disolución que se obtiene apenas difiere del agua de mar original.

Mediante agitación se puede romper esta estructura y obtener cristales sueltos que llegan a alcanzar en intervalos de tiempo variables, entre una y cuatro horas, diámetros de 1 mm. A. Rose y Hoover (12-3) estudiaron este proceso que sigue siendo objeto de incesantes investigaciones.

El problema inicial que tienen que resolver las técnicas de desalado por congelación es el de la obtención de cristales de hielo a una velocidad suficientemente grande, de forma que por sus características ocluyan la menor cantidad posible de aguas madres.

Otro de los problemas cruciales del proceso de congelación es el lavado de los cristales con agua desalada para eliminar las aguas madres. Se comprende que si se lograra formar cristales de hielo con un hábito cristalino diferente que proporcionara cristales compactos, tanto la separación de los cristales como las operaciones subsiguientes de lavado serían más simples, económicas y eficaces.

Al estudiar los procedimientos de conversión por congelación, podremos apreciar cómo los que más se han desarrollado eluden las superficies de transmisión de calor del tipo de serpentines, habituales en las técnicas de refrigeración. El motivo fundamental es que el depósito de los cristales de hielo sobre las superficies de los refrigerantes crea problemas de transmisión de calor. Por ello se han desarrollado técnicas de congelación por evaporación relámpago o por evaporación de líquidos no miscibles con el agua.

Otro aspecto en que pueden apreciarse las ventajas y desventajas de los métodos de congelación frente a otros procesos de conversión, tales como los de destilación, es el que se refiere a la inversión de capital en aparatos. Es cierto, como subraya Fischbeck, que los aparatos necesarios para sustraer calor de un sistema son más caros que los que se necesitan para aportar calor, es decir, que un refrigerador es más caro que una caldera; pero al mismo tiempo es también cierto que la tecnología de los procesos de refrigeración está muy desarrollada, siendo las instalaciones de diseño simple, dimensiones reducidas y lo que es más importante, y se subraya siempre como una ventaja innegable de los procesos de congelación (12-4), es que a las bajas temperaturas a que se verifican, las sustancias capaces de formar incrustaciones permanecen en disolución; y al mismo tiempo, la disminución extraordinaria de los fenómenos de corrosión permite utilizar materiales como el acero ordinario en la construcción de los aparatos. Con ello quedan considerablemente disminuidos los gastos ocasionados por la inversión de capital y los de conservación de las instalaciones.

Bajo el punto de vista del consumo de energía, es evidente que los procesos de desalado no pueden verificarse consumiendo solamente la energía mínima correspondiente a las condiciones de reversibilidad. Como en otras instalaciones térmicas de tipo industrial, es necesario recurrir a datos experimentales para conocer el balance energético. Snyder (12-5) indica como cifras comprobadas por la experiencia, que de la energía total consumida en una instalación de conversión por congelación del agua del mar, un 10% corresponde a la energía mínima necesaria para separar el agua de las sales disueltas ($0,74 \text{ kWh/m}^3$), un 60% corresponde a las pérdidas termodinámicas por trabajar en condiciones de irreversibilidad y un 30% se invierte como energía necesaria para accionar las bombas y el equipo auxiliar de todas clases.

Son cifras que coinciden con las de Spiegler, que menciona la de 7 kWh/m^3 para una instalación con capacidad de producción de $400 \text{ m}^3/\text{d}$.

Siendo el calor latente de fusión de 80 Kcal/Kg , aproximadamente la séptima parte del de ebullición, parece a primera vista que el consumo de energía es menor en los procesos de congelación, lo que le debe dar ventajas económicas. Sin embargo, todas las operaciones de transmisión de calor se verifican con recuperación; y el menor gasto solamente se acusaría en caso de que se verificase en sistemas de efectos simples.

La consecuencia práctica es que, como han establecido claramente Dodge y Eshaya (12-6) y Spiegler (12-7), la economía en cuanto al consumo energético es relativamente pequeña. Sin embargo, Snyder señala que se ha llegado a la conclusión de que los consumos entre 40 y 30 Kwh/4m^3 que se están alcanzando mediante algunas instalaciones de conversión por conge-

ción, son mejores que los mínimos propuestos para los procesos de ebullición, lo que confirma el informe del OSW (12-8), según el cual los métodos de congelación tienen un potencial económico favorable.

Se han desarrollado varios procesos para la obtención de agua dulce a partir de aguas salinas por congelación. En los denominados indirectos se procede de la siguiente forma: La congelación se provoca mediante la evaporación de un fluido frigorífico que circula por un serpentín introducido en el agua del mar. Cuando ésta penetra en la instalación, se enfría haciéndola circular en contracorriente con las aguas madres frías y el agua dulce producida por la fusión del hielo. Una vez enfriada penetra en la cámara de congelación, donde se forman los cristales de hielo al evaporarse el líquido contenido en los serpentines. La papilla cristalina pasa a una unidad de filtración o de separación por centrifugación. Los cristales se someten a lavado con parte del agua desalada. Una vez lavados se transfieren a una unidad de fusión, en la que recibe del fluido refrigerante el calor que éste le sustrajo para congelarlos, con lo cual se funden. El hielo fundido se retira como agua dulce que en parte se usará para lavar los cristales de hielo en la unidad de lavado y que circulará por los intercambiadores de calor para refrigerar el agua de mar que penetra en la instalación. Este método tropieza con dificultades de transmisión de calor a través de la superficie de los serpentines que se recubren de hielo.

Por ello se han desarrollado otros métodos de refrigeración en los que el intercambio térmico se verifica directamente entre el agua del mar y el refrigerante. En uno de ellos, ideado por Zarchin y aplicado en Eilath (Israel), el agua del mar se somete a congelación introduciéndola en una cámara de alto vacío, con lo que se provoca la evaporación relámpago de una parte y la congelación de otra. En principio, por cada litro de agua que se evapora se separa una cantidad de calor suficiente para que se produzca la congelación de siete litros del agua que no se evapora. Las aguas madres se eliminan por lavado en contracorriente, reuniendo después el vapor, previamente comprimido, con el hielo lavado para producir agua pura por condensación del vapor y fusión del hielo, y devolviendo al mar la salmuera que queda sin congelar y la que se arrastra por lavado de los cristales.

Se esperan con cierta ansiedad no exenta de escepticismo (12-9) los resultados prácticos de estas unidades. Este método es el más sencillo y el problema fundamental radica en el desarrollo de compresores eficientes para manejar, en forma de vapor a baja presión, la séptima parte del agua dulce que se produce. Spiegler (12-7) menciona algunos detalles numéricos correspondientes a las condiciones de funcionamiento de estos procesos directos. La presión en el congelador se mantiene suficientemente baja haciendo constantemente un vacío entre 3 y 4 mm de Hg. El hielo se somete a lavado

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

y se pasa a una cámara de fusión en la que la presión de vapor es de 4,6 mm. El vapor formado durante el proceso de congelación, que al estar a tan bajas presiones ocupa un volumen muy grande, se ha de comprimir hasta 4,6 mm. Cada Kg. de vapor así comprimido funde 7,5 Kgs. de hielo y como la compresión adiabática produce más calor del necesario, se ha de utilizar un equipo de refrigeración auxiliar, para mantener la temperatura a 0°C y evitar el aumento de presión que se produciría y que tendría que vencer el compresor. Se puede evitar el uso de compresores mediante técnicas de absorción del vapor con disoluciones concentradas de sales, tales como cloruro o bromuro de litio, que después se hierven para recuperar el vapor. El proceso Carrier utiliza esta técnica de absorción y ha sido descrito en (12-11). Se aplicará a una planta piloto con capacidad para unos 60 m³/día en Harbord Island (12-10).

Otro proceso, fundamentalmente diferente, provoca la congelación del agua por evaporación de un líquido refrigerante, tal como el butano o el isobutano, que tienen la característica de ser completamente inmiscibles con el agua, con lo que se evita toda la complicación que surge como consecuencia de la presencia de superficies de transmisión de calor sólidas en los procesos de congelación. Este sistema necesita que el refrigerante tenga un punto de ebullición que se encuentre justamente por debajo del punto de congelación del agua salina. El isobutano que hierve a -10,2°C cumple esta condición. Se inyecta isobutano líquido en el agua del mar, con lo que se evapora y produce hielo. El vapor de isobutano se comprime, licúa y recicla, evitando toda clase de pérdidas.

Este proceso ha sido utilizado y está siendo sometido a evaluación en St. Petersburg (Florida) por el OSW, en una instalación capaz de producir 140 m³/día. Se espera que estos procesos y otros como el de Strutters-Umano (12-12), una vez superen el estadio de plantas piloto y puedan aplicarse a instalaciones de gran capacidad (del orden de 8 a 40.10³ m³/día) puedan reducir el precio del agua convertida hasta niveles del orden de 0,5-0,8 \$ por 1000 g. (8-13 ptas./m³).

Estos precios no permitirán el uso del agua convertida para aplicaciones agrícolas, pero podrán resolver muchos de los problemas de escasez de agua dulce en ciudades costeras o próximas a yacimientos de aguas salinas.

NOTAS

- (XII-1) FISCHBECK, *Dechema Monographien* Bd. 47, 756.
- (XII-2) TAMMAN, G., Y BÜCHNER, A., *Z. Anorg. und allg. Chem.*, 222 (1935), 12 y 371.
- (XII-3) ROSE, A., Y HOOVER, TH., *Saline Water Research and Development Progress Report*, 7 (1955).
- (XII-4) *Progress in Saline Water Conversion*, Task Group Report, J.A.W.W.A., 53, 1091 (1961).
- (XII-5) SNYDER, *Scientific American*, 207 (6) (1962), 41.
- (XII-6) Dodge y Eshaya, *Thermodynamics of some Desalting Processes, Saline Water Conversion*, "Advances in Chemistry Series", 27, Am. Chem. Soc: 1960.
- (XII-7) SPIEGLER, K. S., *Salt Water Purification*, pg. 107 y Ap. 6 A.
- (XII-8) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 46.
- (XII-9) DEUTCH, M. J., *Chimie et Industrie*, 89,5 (1963), 558.
- (XII-10) Labine, R. A., *Chem. Eng.*, 67 (1960), 156.
- (XII-11) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 46.
- (XII-12) *Chem. Eng.*, 69 (1962), 78.

XIII

CRISTALIZACIÓN DE HIDRATOS

*Wenn einer, der mit Mühe kaum
gekrochen ist auf einen baum
schön meint, dass er ein Vögel wär,
so irrt sich der.*

W. BAÜSCH

Evidentemente uno de los procesos químicos más sencillos para la conversión de aguas saladas en agua dulce es el de la formación de hidratos. Cristalizado el hidrato y separado de las aguas madres, su descomposición térmica nos proporcionará agua pura.

Pero para que este método pueda convertirse en un procedimiento práctico de conversión en gran escala de aguas salinas, el hidrato que se escoja tendrá que cumplir ciertos requisitos, entre los que será fundamental que tanto la formación como la descomposición sean procesos que exijan el consumo de muy poca energía y puedan verificarse en condiciones que difieran poco de las normales.

No es por ello sorprendente que los hidratos de los gases, que desde hace unos cien años habían llamado la atención de los químicos por su composición singular, sean los que por sus caracteres especiales se hayan podido aplicar a los procesos de desalado, pues se forman y descomponen con suma facilidad.

Sabemos, gracias a los trabajos de Stackelberg, Claussen, Pauling y otros autores, que dichos hidratos son compuestos "clatratos", que se forman cuando el agua se solidifica en presencia de ciertas moléculas que reúnan determinadas condiciones en cuanto a sus dimensiones y actividad química. Dan origen a estructuras cristalinas sumamente abiertas, en las que las moléculas de agua, uniéndose unas a otras mediante puentes de hidrógeno, dejan espacios cerrados a modo de "jaulas" en los que quedan incluidas

las moléculas extrañas. Estas estructuras abiertas solamente se estabilizan cuando algunos o todos los huecos se encuentran ocupados por tales moléculas (13-1).

La composición de los compuestos "clatratos" del agua y sus restantes propiedades han sido objeto de una revisión detallada de Mandelcorn (13-2), y sus estructuras han sido dilucidadas merced a los trabajos de Jeffrey y sus colaboradores (13-3). La "jaula" está formada por un retículo poliédrico a base de veinte moléculas de agua que se asocian en forma de dodecaedros pentagonales, y estas unidades básicas se asocian a su vez entre sí delimitando agrupaciones con huecos mayores en los que caben moléculas de hasta 17 angstroms de longitud, como las de propano, yoduro de metilo o cloruro de etilo.

El hecho de que los gases inertes sean capaces de formar compuestos de este tipo, es claro indicio de que entre la molécula ocluida y la formadora del retículo-jaula, actúan solamente fuerzas débiles del tipo de Van der Waals, y como, por otra parte, los enlaces entre las moléculas de agua son enlaces por puentes de hidrógeno, nos encontramos ante estructuras que podrán formarse y romperse con manifestaciones energéticas mucho menores que las que intervienen en la formación de los compuestos químicos ordinarios.

No obstante, debemos tener presente que el hielo debe también su estructura abierta a la asociación de las moléculas de agua mediante puentes de hidrógeno, por lo que debemos esperar que en los procesos de formación y ruptura de los clatratos intervengan energías del mismo orden que las que se manifiestan en los procesos de congelación.

Pero por otra parte, como los compuestos clatratos son en general sustancias de estructura cristalina bien definida, que pueden formar cristales de caracteres diferentes de los del hielo y manipularse en condiciones distintas, es lógico que constituyan la base de un método potencial de desalado del agua del mar, mediante el que pueden eludirse algunos de los complejos problemas técnicos, provocados por la oclusión de aguas madres, con los que tropiezan los métodos de congelación.

Por ello, ya en 1961 (13-4) se inician los primeros ensayos para la conversión de aguas salinas mediante la cristalización de los hidratos de los hidrocarburos (cuya formación había sido causa desde hacía años de dificultades en las fábricas de gas del alumbrado), continuando su cuidadoso estudio en la actualidad al haberse observado que presenta caracteres técnicos muy semejantes a los de algunos de los procesos de conversión por congelación y algunas ventajas posibles que han sido expuestas con claridad extraordinaria por Winans (13-5).

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

El proceso implica la formación en escala industrial del hidrato sólido de un gas tal como el propano; la separación del mismo de las aguas madres, y, por último, su descomposición con liberación del propano, que volverá a utilizarse, y de agua dulce.

Aun cuando se conocen muchos hidratos de gases, el escoger una sustancia tal como el propano se debe a que reúne una serie de características muy favorables cuya enumeración nos permitirá apreciar sus ventajas.

En primer lugar, la composición del hidrato es particularmente satisfactoria, pues, dada su estructura, por cada molécula de propano contiene entre 17 y 18 moléculas de agua.

La temperatura de equilibrio a que se forma (o se descompone) el hidrato oscila entre 1,7 y 7°C, siendo por tanto superior a la de formación o fusión del hielo de la misma salinidad. Esto supone una ventaja, pues implica menos consumo de energía en las instalaciones de refrigeración y menores pérdidas térmicas.

Por otra parte, las temperaturas son suficientemente bajas para que los problemas de corrosión por las aguas salinas sean análogos a los que se presentan en los procesos de congelación y desde luego para que desaparezcan todos los problemas de formación de incrustaciones.

Como los procesos se han de verificar a bajas temperaturas, se comprende que desde el punto de vista técnico sean muy semejantes a los de congelación. En este aspecto, el propano presenta también una serie de ventajas tales como las de poseer excelentes condiciones termodinámicas para actuar como líquido refrigerante, destacando además las siguientes propiedades: Su bajo precio y abundancia; su falta de toxicidad; su baja solubilidad en el agua, que permite utilizarlo como agente directo de transmisión de calor y la posibilidad de licuarlo mediante el uso de presiones razonables, del orden de 4 a 5 kg/cm².

Pero la ventaja fundamental sobre los procesos de congelación es que los cristales del hidrato se pueden lavar a temperaturas superiores al punto de congelación del agua, lo que simplifica extraordinariamente las condiciones de esta operación al evitar los peligros de una obstrucción de la papilla cristalina por congelación del agua usada para el lavado.

Por otra parte, las características de los diferentes hidratos pueden ser ventajosas con respecto al hielo, en cuanto a las dimensiones y forma de los cristales, lo que explica que se estén estudiando numerosas sustancias capaces de formar hidratos.

Por el momento, los procesos de formación de hidratos se encuentran en fase experimental de construcción de plantas piloto que permitan evaluar más detalladamente las condiciones técnicas y las posibilidades de dar origen a procesos industriales en gran escala.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

NOTAS

- (XIII-1) S. M. HAGAN, *Clathrate Inclusion Compounds*. "Reinhold Publishing Corp." (1962).
- (XIII-2) MANDELCORN, L., *Chem. Rev.*, 59, 827 (1959).
- (XIII-3) JEFFREY, G. A., *Dechema Monographien*, B. 47, 849 (1962).
- (XIII-4) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 39 (1) (1961), 37.
- (XIII-5) WINANS, C. F., *The Gas Hydrate Process for Fresh Water Recovery*, Dechema Monographien, Bd. 47, 839 (1962).
- (XIII-6) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (23) (1963), 49.
- (XIII-7) KNOX, W. G., HESS, M., JONES, G. E., Y SMITH, H. B., *The Hydrate Process*, "Chem. Engr. Progr." 57 (1961), 66.

XIV

PROCESOS QUE USAN MEMBRANAS

*"There was the Door to which
I found no key,
There was the Veil through which
I might not see".*

RUBAIYAT, OMAR KAYYAM

Los procesos en los que se usan membranas, separan el agua de una disolución salina, o las sales de la misma, mediante la acción de membranas de acción selectiva. Las membranas pueden actuar como si fueran simplemente materiales porosos, permeables al agua e impermeables a la sal, de acción aparentemente análoga a la de un filtro, pero más compleja. Es el tipo de membranas que se aplican en los procesos denominados de ósmosis inversa o hiperfiltración. Cuando se comprime la disolución salina contra una de estas membranas, aplicando una presión superior a la presión osmótica, el agua dulce fluye a través de la membrana. El proceso puede realizarse con elevada eficacia termodinámica y carácter continuo, aunque en la práctica se tropieza con la dificultad de disponer de membranas adecuadas.

Una variante de este método utiliza, como medio de separación, una discontinuidad gaseosa situada entre dos tabiques porosos que soportan la diferencia de presión y mantienen aisladas la fase líquida de la gaseosa. Este proceso se encuentra en fase de investigación teórica.

Otros tipos de membranas unen a la acción mecánica la acción de fuerzas eléctricas, quedando gobernado el proceso de separación o bien por los fenómenos de canje iónico o por la acción de campos eléctricos a través de membranas de resinas de canje iónico.

Las resinas de canje iónico permiten desalar el agua del mar. Han sido utilizadas en pequeña escala en equipos salvavidas y se han utilizado también para el tratamiento de aguas salobres con cierto éxito, pero la técnica

no puede aplicarse en gran escala para el tratamiento del agua del mar, a causa de los grandes gastos que supone la regeneración de las resinas. Recientemente (14-1) se han realizado ensayos para determinar la posibilidad de regenerarlas mediante CO_2 a presión, lo que marcaría nuevas posibilidades para este método, que por el momento debe considerarse complementario de otros.

Cuando las resinas de canje iónico se utilizan como medio de separación que actúa bajo la acción de un campo (electrodialisis), su mecanismo es completamente diferente del de canje iónico y permiten la separación de las sales contenidas en las aguas salinas. El método ha alcanzado importancia práctica considerable, por ser el más económico de los conocidos para la conversión de aguas salobres. Tendrá aplicación al agua del mar si se logra disponer de membranas suficientemente baratas.

El procedimiento denominado *osmiónico* se basa también en el uso de membranas de canje iónico como barreras de separación selectiva, pero en lugar de una fuerza electromotriz, aplica una diferencia de concentraciones entre las disoluciones situadas a ambos lados de la membrana, para conseguir la transferencia de sales.

Todos estos procesos tienen como características generales el no requerir cambios de temperatura, exigiendo simplemente la creación de un gradiente de presión, de concentración o de campo eléctrico, capaces de producir un flujo de agua o de iones a través de las membranas. Casi siempre (salvo si existe una discontinuidad gaseosa), son métodos en que no hay cambio de fase, en contraste con los métodos de destilación o de congelación que hemos estudiado precedentemente. Se presentarán por tanto irreversibilidades y sobre todo pérdidas de energía por frotamiento, que usualmente son mucho mayores que la energía mínima correspondiente a un proceso ideal realizado en condiciones reversibles.

Lo mismo que en los casos anteriormente estudiados, cuanto más intentemos aproximarnos a las condiciones de reversibilidad, con el fin de disminuir el consumo específico de energía, tanto menores deberán ser las fuerzas o gradientes aplicados, con el objeto de disminuir las pérdidas por frotamiento. Pero en cuanto se disminuyan las fuerzas aplicadas, disminuirá la velocidad del proceso y se reducirá la capacidad de producción por unidad de área de la membrana. En consecuencia, cuanto nos aproximemos a las condiciones de reversibilidad, tanto mayores tendrán que ser las superficies de membrana utilizadas para lograr una determinada producción. Con ello el problema técnico presenta las mismas características que en casos precedentes y la selección de las dimensiones de una instalación tendrá que ir precedida de los correspondientes cálculos económicos, en que intervendrán contrapuestos los gastos de energía y los derivados de la inversión de capital.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Cuando se comparan los procesos de electrodiálisis con los de destilación y congelación desde un punto de vista económico, resultan más baratos para la separación de las sales de las aguas salinas de baja concentración (entre 1.000 y 5.000 ppm), mientras que para el agua del mar son más caros. Se deduce, teniendo en cuenta que en el agua del mar por cada mol de sales hay cien moles de agua, que para dos procesos de igual costo, el transporte de una mol de agua, sacándola de la disolución, puede lograrse con un gasto inferior a la centésima parte de lo que cuesta extraer una mol de sal (14-2).

Esta diferencia, que explica la posición relativa de los métodos de electrodiálisis frente a los de destilación o congelación, deriva de la acción de las fuerzas electrostáticas que dimanan de los iones, y permite comprender por qué, a pesar de que aparentemente los métodos de purificación que extraen la pequeña cantidad de sales presentes en el agua del mar deberían ser más ventajosos que los que separan el agua de las sales, en la práctica esta ventaja quede limitada a la separación de los iones contenidos en las aguas salobres de baja concentración.

La electrodiálisis simple es un método de laboratorio usado para separar coloides de electrolitos, mediante un dispositivo que tiene tres compartimentos delimitados por membranas permeables a los iones, por ejemplo de celofán. Sendos electrodos situados en los compartimentos extremos permiten eliminar los iones del líquido que ocupa el compartimento central, por acción electrostática.

Pero el proceso usado en la desmineralización de las aguas salobres es el de electrodiálisis múltiple, que hace uso de membranas permiselectivas. Este método ha sido descrito detalladamente en una reciente monografía de Wilson (14-3).

E. Sieveka (14-4) ha dado una descripción simple de la forma en que actúan estas membranas, que constituyen la parte más importante de los electrodiálizadores usados en la desmineralización de aguas y son de dos tipos. Membranas catiónicas que permiten el paso a su través de cationes sometidos a la acción de una caída de potencial, y membranas aniónicas, que en análogas circunstancias solamente permiten el paso de aniones. Aun cuando las membranas tienen la misma naturaleza química que las resinas de canje iónico, el mecanismo de canje no interviene propiamente en el proceso: Las membranas se limitan a actuar como un camino o medio de transferencia selectiva de los iones de determinada carga.

El cuerpo de las membranas está formado, en su parte esencial, por una resina de canje iónico constituida por un anión (o catión) gigante, que contiene multitud de cargas eléctricas (fijas sobre determinados grupos funcionales enlazados a la malla de la resina por covalencia) y el número correspondiente de iones de signo contrario que mantienen la electroneutralidad,

pero que se caracterizan por ser móviles y desplazables. Estas membranas, aun cuando son muy poco permeables al agua, son capaces de sufrir imbibición y suelen contener, en condiciones de funcionamiento, de un 30 a un 40% de su peso de agua. Por ello, los iones móviles en el seno de la membrana se pueden desplazar como si lo hicieran en el seno de una disolución acuosa, que se continúa con las disoluciones salinas con que se pone en contacto. Si se trata de una membrana catiónica, las cargas móviles positivas corresponden a distintos cationes y las cargas negativas a grupos funcionales orgánicos del tipo $-\text{SO}_3^-$ o $-\text{COO}^-$.

De forma semejante, en las membranas aniónicas las cargas móviles corresponden a aniones, mientras que las cargas positivas fijas, incapaces de desplazamiento, suelen ser iones de amonio cuaternario. La experiencia ha demostrado (15-5) que en la electrodiálisis solamente pueden usarse membranas de canje aniónico fuertemente básicas y membranas de canje catiónico fuertemente ácidas, que son las únicas que poseen propiedades permiselectivas.

La necesidad de que las membranas permiselectivas posean un conjunto complejo de propiedades, desde el punto de vista técnico, ha hecho que se hayan preparado por multitud de procedimientos. Muchas veces, para mejorar su comportamiento, contienen la resina de canje iónico engastada en un cemento de polietileno, poliestireno o cloruro de polivinilo (14-6), o se forman mediante reacciones de policondensación o poliadición (p. ej., es posible obtener una membrana negativa por condensación de fenol, un aldehído y ácido sulfúrico a elevada temperatura, o una membrana positiva por condensación de melamina, guanidina y formaldehído). En el tomo 47 de las "Dechema Monographien" se incluyen numerosos trabajos acerca de la separación y propiedades de las membranas permiselectivas.

Cuando una de estas membranas se pone en contacto con una disolución salina, se hincha y se produce una fase líquida continua, en que solamente hay posibilidad de desplazamiento de los iones de tipo móvil. La teoría más generalmente aceptada acerca de la forma de actuar estas membranas se debe a Teorell y a Meyer y Sieverts (modelo M.S.T.) (14-7, 8).

Las membranas permiselectivas deben cumplir muchos requisitos desde el punto de vista de su posible aplicación en condiciones industriales. Así, en el aspecto químico-físico deben poseer una gran selectividad, propiedad que es función de la concentración de grupos activos, es decir, del número de grupos activos por cm^2 de agua imbibida.

Como están sujetas al fenómeno de electroendósmosis, que produce pérdidas del agua purificada, deben tener un índice de transporte de agua que sea lo menor posible.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Deben poseer elevada conductividad eléctrica, para que no se produzcan grandes pérdidas de energía eléctrica al paso de la corriente, y baja difusibilidad para las sales.

Muchas veces, para satisfacer a estas diversas condiciones, tendrían que poseer cualidades contradictorias, por lo que frecuentemente se tiene que adoptar una solución de compromiso (p. ej., el transporte de agua por electroendósmosis es mínimo cuando la membrana imbebe muy poca agua, pero en este caso su resistencia eléctrica es muy grande y la movilidad de los iones que han de atravesar la membrana se hace muy pequeña).

Por otra parte tienen que satisfacer determinadas condiciones de resistencia mecánica. Para ello tienen que ser suficientemente gruesas, lo que a su vez provoca un aumento de resistencia eléctrica. Deben poseer estabilidad dimensional, no quedar sujetas a agrietamientos, dilataciones o contracciones que impedirían su uso, y tener una vida razonable.

Ante un conjunto tan complejo de condiciones, a las que habría que añadir las de resistencia química frente a las variaciones de pH, acción del cloro libre y otras que puedan presentarse en las aguas tratadas, sorprende que en la actualidad se disponga de muchas membranas que son satisfactorias y sin las cuales la electrodiálisis industrial de las aguas salobres hubiera sido completamente imposible.

Los electrodiálizadores están constituidos en su parte fundamental por una serie de membranas catiónicas y aniónicas, dispuestas alternativamente y separadas mecánicamente entre sí, de modo que se formen una serie de compartimientos que tengan una pared permeable a los cationes y otra a los aniones. En los compartimientos externos se introducen sendos electrodos que se conectan a una fuente de corriente continua. Cuando se somete el agua salobre que pasa a través del electrodiálizador a la acción de la corriente, dada la disposición de las membranas, se produce la acumulación de los iones en compartimientos alternos con otros en los que se produce un empobrecimiento. Disponiendo varias unidades en serie se puede llegar a obtener agua desmineralizada.

El grueso de las membranas puede variar de unas décimas de mm. a un mm. y el espaciado entre las membranas, que permite el paso del agua a purificar, del agua disionizada y de la salmuera resultante, suele ser de 1 mm. Una unidad puede tener, p. ej., hasta 300 membranas permiselectivas (150 catiónicas y 150 aniónicas) con los correspondientes espaciadores que permiten el paso del agua en dos sentidos alternativos. El agua debe circular constantemente entre las membranas, pues de lo contrario, cuando se alcanza el régimen estacionario se forman capas casi agotadas en contenido en iones frente a las caras de las membranas, que ofrecen mucha resistencia al paso de la corriente. Los espaciadores, al tiempo que mantienen separadas las

membranas, obligan al agua a seguir un camino tortuoso para que se mezcle bien y no se produzca el fenómeno de agotamiento.

El cálculo de las dimensiones óptimas de un electrodializador se verifica de la siguiente forma, según Spiegler (14-9), basándose en ideas de Cowan (14-10).

El precio del agua dulce obtenida d , puede considerarse formado por la suma de tres términos

$$d = a \cdot i + \frac{b}{i} + c$$

en que a , b y c son constantes, representando i la densidad de corriente. El primer sumando corresponde al consumo de energía eléctrica, que es proporcional a la densidad de corriente; el segundo, a las dimensiones (o superficie) del electrodializador, que será inversamente proporcional a la densidad de corriente y a él le corresponde el capital invertido; el tercer término representa los gastos de tratamiento químico de las aguas, para evitar la formación de incrustaciones y otros gastos fijos.

El problema de lograr el precio óptimo se resuelve determinando el valor de i que hace mínimo a d y corresponde a

$$i = \sqrt{b/a}$$

Las densidades de corriente utilizadas para aguas con 5.000 ppm oscilan entre 6 y 20 mA/cm².

Los valores de la densidad de corriente no pueden superar cierto límite, pues si las intensidades son excesivamente altas provocan grandes variaciones de concentración, que a su vez son causa de la formación de incrustaciones, debidas a las variaciones de pH provocadas por la intervención de los iones H⁺ y OH⁻ en los fenómenos de transporte a través de la membrana, cuando las concentraciones de los iones de las sales se hacen demasiado pequeñas. Con ello se presenta la misma tendencia a la precipitación de CaCO₃ y Mg(OH)₂, que ya describimos al hablar de los procesos de destilación. La regulación del pH será el medio más eficaz para evitar la formación de estos compuestos, que únicamente pueden precipitar en medio alcalino. Por otra parte, si se quiere evitar la precipitación del CaSO₄, es necesario impedir que el producto iónico llegue a superar al producto de solubilidad. Como las aguas salobres son de composiciones muy variadas, habrá que determinar en cada caso cuidadosamente las condiciones de operación y particularmente la concentración máxima de sales en las proximidades de las membranas.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Otro fenómeno que tiene gran importancia en la electrodiálisis de las aguas salobres es el *envenenamiento* de las membranas permselectivas por los iones polivalentes de metales pesados, lo que exige frecuentemente tratamientos previos de eliminación por métodos químicos.

Se calcula que a finales de 1960 existían más de 60 instalaciones de electrodiálisis en funcionamiento en todo el mundo. Algunas de ellas, como la de Coalinga (14-11), han estado funcionando con éxito durante más de dos años, con una capacidad de sólo unos 100 m³/día. El precio es alto (1,43 \$ por 1.000 g., 23 ptas. / m³), pero se atribuye en parte a las reducidas dimensiones de la instalación.

Por otra parte se dispone de datos de la instalación experimental del OSW en Webster (14-12), que corresponden a una producción de 1.000 m³/d.

El agua a tratar contiene unas 1.800 ppm de sales disueltas y una dureza considerable. Se calcula que el precio será de 12-14 pts./m³, siendo los factores que motivan este valor: la presencia de hierro y manganeso, que han de ser eliminados previamente por tratamiento químico con permanganato y zeolitas; la elevada dureza del agua, que obliga a mantener el pH a valores suficientemente bajos mediante adiciones de H₂SO₄; la baja temperatura del agua (unos 9°C), y las dimensiones de la instalación.

Se ha calculado mediante extrapolación, que si la capacidad de las instalaciones se aumentase hasta hacerlas capaces de producir de 4 a 40.000 m³/día, aplicando la electrodiálisis a aguas salobres con contenido de sales entre 1.000 y 5.000 ppm, se podrán conseguir precios del orden de 4-8 pts. m³ en condiciones suficientemente favorables (14-13), e incluso que será posible reducir el precio, dado el desarrollo tecnológico que el método está experimentado.

Spiegler señala como particularmente interesantes las pequeñas unidades compactas, que proporcionan entre 50 y 100 litros de agua dulce por día; consumen menos de 60 vatios y pueden utilizarse como cualquier otro de los aparatos de uso frecuente en economía doméstica.

Según Cowan (14-14), el gran número de tipos de electrodiálizadores ha obligado al OSW a realizar estudios comparativos para dilucidar cuáles son los óptimos y comparar los precios de la conversión por electrodiálisis con los que se logran por las demás técnicas de desalado.

La electrodiálisis ha sido sometida a cuidadoso análisis como operación unitaria por Mintz (14-15), y el reciente informe del OSW (14-16) indica que los avances recientes en las técnicas de membrana pueden hacer posible que la electrodiálisis se aplique también a la conversión del agua del mar.

Otro método semejante a la electrodiálisis y que usa las mismas membranas es el ideado por Murphy (14-17), que lo denominó osmiósis, por no intervenir en el mismo más que fuerzas osmóticas e iónicas. En la osmió-

nisis no se usa el campo creado por una corriente eléctrica, sino que el potencial es creado mediante una disolución salina concentrada. Usa el llamado potencial de concentración. En su forma más simple el proceso podría realizarse mediante un conjunto de cuatro membranas, dos catiónicas y dos aniónicas, separadas entre sí por sendos espacios y ordenadas alternativamente como en los electrodiálizadores. El sistema sería: salmuera- C_1 -1- A_1 -2- C_2 -3- A_2 -salmuera indicando C_1 , C_2 , A_1 y A_2 las membranas catiónicas y aniónicas y los números 1, 2, 3, los espacios que quedan entre las mismas, que se llenan del agua que se pretende desalar. Dada la concentración elevada de la salmuera, la membrana C_1 dejará que pasen al espacio 1 cationes y para que pueda mantenerse la electroneutralidad será menester que a través de A_1 pasen procedentes de 2 los aniones necesarios. De la misma forma, la membrana A_2 deja penetrar en el espacio 3 aniones procedentes de la salmuera como consecuencia del gradiente de concentración. Pero estos aniones atraen a través de la membrana catiónica C_2 los cationes correspondientes, procedentes del espacio 2. En consecuencia, el agua salina del espacio 2 se va desmineralizando al perder sus cationes y aniones y el fenómeno sirve de base a métodos de desalado.

Estos procedimientos son sugestivos puesto que eluden la necesidad de disponer de energía eléctrica, pudiendo utilizar como disoluciones salinas concentradas, aguas madres de las salinas.

Sin embargo, para convertirse en métodos capaces de ser empleados en gran escala, tropiezan con la dificultad de que la velocidad de difusión de los iones a través de las membranas resulta demasiado pequeña, en particular la de los iones polivalentes, y ello tiene como consecuencia necesaria el que las dimensiones de las instalaciones deban ser muy grandes, lo que implica grandes inversiones de capital y por consiguiente precios altos.

Aunque se han construido desionizadores osmiónicos en escala de laboratorio, no parece que el método puede llegar a convertirse en proceso industrial.

Otro proceso que utiliza membranas es el denominado de hiperfiltración o, más frecuentemente, de osmosis inversa.

Aprovecha las propiedades semipermeables de muchos tipos de membranas, tales como las de acetato de celulosa, alcohol polivinílico, membranas de canje iónico dotadas de buena permeabilidad, etc.

Cuando se sitúa una membrana semipermeable entre el agua del mar y agua dulce, se establece un flujo de agua a través de la membrana, que trata de igualar las concentraciones, y que solamente se detiene cuando tiene que vencer una presión de 24,8 atmósferas, que es la presión osmótica del agua del mar. Si se aplica sobre ésta una presión mayor, se producirá el flujo de agua dulce en sentido inverso: Este es el fenómeno de osmosis inversa.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Como a medida que la disolución salina se vaya concentrando su presión osmótica irá aumentando, será necesario aplicar presiones de hasta 50 atmósferas cuando la concentración del agua salina se haya duplicado.

Pero como las presiones indicadas son las correspondientes al estado del equilibrio osmótico, el flujo de agua dulce será infinitamente lento y si se quiere que su velocidad aumente se tendrán que aplicar presiones mayores. Habrá una cierta proporcionalidad entre el aumento de la presión y la velocidad de flujo, pero el incremento de presión requerirá el uso de membranas mecánicamente resistentes (y por tanto gruesas), que opondrán gran resistencia al paso del agua. Por ello, las presiones que se utilizan en la práctica no pueden pasar de unas 100 a 125 atmósferas.

El método de osmosis inversa tiene una serie de características favorables entre las que destacan:

- 1) Su simplicidad.
- 2) El bajo consumo de energía que en ciertas condiciones se ha calculado que podría reducirse a 3,5 kwh/m³.
- 3) La posibilidad de recuperar mediante turbinas buena parte de la energía de compresión.
- 4) El carácter continuo del proceso.
- 5) Los bajos gastos de operación.
- 6) El funcionamiento a temperatura ambiente, que evita los problemas de pérdidas de energía térmica.
- 7) La ausencia de problemas de corrosión y de formación de incrustaciones, tan perturbadoras para otros procesos.

Sin embargo, desde un principio se tropezó con la dificultad de que las membranas utilizables daban caudales muy reducidos, del orden de 0,004 a 0,1 litros por metro cuadrado, día y atmósfera en exceso sobre la presión osmótica (14-18); siendo aún más grave que, con el tiempo, quizás por ser arrastradas las fracciones ligeras de los polímeros, o por alteración hidrolítica de la estructura de los materiales orgánicos utilizados, las membranas acaban por perder el carácter selectivo que les permite actuar como membranas semipermeables.

De aquí los continuados esfuerzos realizados para lograr membranas de características más favorables.

Se están realizando programas de investigación, como el de la Monsanto Research Corporation, para obtener la información básica acerca de los grupos estructurales y funcionales que permitan lograr la máxima permeabilidad y selectividad, así como otros estudios encaminados a establecer las consecuencias de diversos tratamientos químicos y radioquímicos (14-19).

Destacan en este conjunto los resultados logrados por Loeb y Sourijarán (14-20), al obtener membranas de acetato de celulosa de permeabilidad parti-

cularmente grande, por disolución en acetona y adición de disoluciones acuosas de perclorato de magnesio, siguiendo técnicas que describe Loeb (14-21). Mediante estas membranas se ha preparado una instalación de desalado de capacidad de $2\text{m}^3/\text{día}$, a base de una velocidad de filtración de 125-450 litros/ m^2 .

Más recientemente (14-22), la Aerojet General ha desarrollado membranas de acetato de celulosa que parecen prometedoras.

No obstante, los estudios siguen realizándose en escala de laboratorio.

Si las aguas son fuertemente salinas, las resinas de canje iónico no pueden utilizarse por motivos económicos, derivados de la gran cantidad de reactivos necesarios para su regeneración. Se calcula que el método resultaría unas quince veces más caro que los demás que permiten obtener agua dulce a partir de agua del mar. Sólo en circunstancias muy singulares se ha utilizado para producir agua potable en Eilat (Israel) o en el lago Sor Bulak de Kazakstan.

Las resinas de canje iónico de tipos especiales se han empleado en casos de emergencia durante la pasada guerra mundial. Se trata de la obtención de pequeñas cantidades de agua en situaciones en que el precio no importa. Los cambiadores se preparan en forma de sales de plata de resinas de canje iónico. En contacto con el agua del mar se produce el canje de los iones sodio por iones plata y éstos se combinan con los iones Cl^- que precipitan. El sulfato de magnesio se elimina mediante una resina en forma de sal de bario. El magnesio deja en libertad una cantidad equivalente de iones bario que precipitan con los iones sulfato. Estos procesos sirvieron de base a muchas patentes y dieron origen a otras mezclas de resinas de canje iónico con hidróxidos de bario y de plata, que permitieron la preparación de conglomerados que, siendo de poco volumen, resultaron adecuados en caso de naufragio. Así, algunos de éstos permiten la obtención de dieciséis litros de agua dulce por litro de conglomerado.

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

NOTAS

- (XIV-1) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 48.
- (XIV-2) WEGELIN, E., *Review of membrane processes for saline water Conversion, Dechema Monographien*, Bd 47, 427.
- (XIV-3) WILSON, ED., *Demineralization by Electrodialysis*, "Butterworths Scientific Publications", Londres, 1960.
- (XIV-4) SIEVEKA, E. H., *J.A.W.W.A.*, 52 (1960), 556.
- (XIV-5) RUNGE, F., *Beziehungen zwischen Struktur und Electrochemischen Eigenschaften von ionenaustauchermembranen*, "Dechema Monographien", Bd. 47, 446.
- (XIV-6) HAZENBERG, J. F. A., *Preparation of Ion-selective Membranes*, Dechema Monographien, Bd. 47, pg. 487.
- (XIV-7) TEORELL, T., *Proc. Soc. Expt. Biol. Med.*, 33 (1935), 282.
- (XIV-8) MEYER, K. H., Y SIEVERTS, J. F., *Helv. Chim. Acta.*, 19 (1936), 649, 665, 987 y 20 (1937), 634.
- (XIV-9) SPIEGLER, K. L., *Salt Water Purification*, pg. 91.
- (XIV-10) COWAN, H. J., *Interaction of Technical and Economic Demands in the Design of large-scale Electrodialysis Demineralizers*. "Saline Water Conversion, Advances in Chemistry Series", 27, pg. 224. (Am. Chem. Soc.).
- (XIV-11) CARY, E. S., ONGERTH, H. J., Y PHELIS, R. O., *Domestic Water Supply Demineralization at Coalinga*, *J.A.W.W.A.*, 52 (2) (1960), 585.
- (XIV-12) CHOPEY, N. P., *Chemical Engineering* (1962), 104.
- (XIV-13) *Progress in Saline Water Conversion*, Task Group Report, *J.A.W.W.A.*, 53 (1961), 53.
- (XIV-14) COWAN, H. J., *Electrodialysis-Equipment and Membranes*, *Chem. Engr. Progress*, 57 (1961), 72.
- (XIV-15) MINTZ, *Electrodialysis*, *Industrial and Engineering Chemistry*, 55 (1963), 19.
- (XIV-16) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 47.
- (XIV-17) MURPHY, G. W., *Osmionic Demineralization*. *Ind. Eng. Chem.*, 50, 1181 (1958).
- (XIV-18) SPIEGLER, K. L., *Salt Water Purification*, pg. 124.
- (XIV-19) GILLAM, W. S., Y MCCUTCHAN, J. W., *Science*, 134 (1961), 1041.
- (XIV-20) LOEB Y SOURIJARAN, *Chem. Eng. News*, 38 (1960), 64.
- (XIV-21) LOEB, S. Y MILSTEIN, F., *Sea water demineralization by means of a semi-permeable membrane*, *Dechema Monographien* Bd. 47, 707.
- (XIV-22) ANÓN. *Chem. and Eng. News*, 41 (1963), 47.

XV

SIMBIOSIS DE PROCEDIMIENTOS

El porvenir de la Humanidad no se encuentra en el corazón del átomo, sino en el corazón del hombre.

STIMMSON

Reiteradamente hemos indicado que una de las directrices que deben seguirse para aliviar el proceso de conversión de las cargas económicas, que impiden por el momento la resolución total de los problemas de escasez de agua, es la asociación de procesos que se complementen económicamente, tales como la simbiosis de la obtención de energía eléctrica y desalado del agua, o el aprovechamiento de las sales contenidas en el agua del mar.

Minken (15-1) indica que las combinaciones de este tipo constituyen el sistema que ofrece el costo mínimo per capita para la producción simultánea de energía y agua potable, siendo múltiples las asociaciones que pueden establecerse entre los distintos procedimientos de desalado y los de obtención de energía, si bien para evitar falsas impresiones acerca de los descensos de precio conseguidos para el agua, debe considerarse siempre el precio combinado del agua y de la energía consumida por habitante.

Tras un detallado estudio económico, Minken llega a la conclusión de que, aun cuando los aspectos económicos de los procesos considerados son tan complicados que no es posible deducir conclusiones válidas para todas las circunstancias, el factor decisivo es siempre la relación entre la demanda de energía y la demanda de agua. Cuando esta relación alcanza valores grandes, es ventajoso combinar los procesos de obtención de energía eléctrica con los de obtención de agua dulce por destilación. Si disminuye esta relación, se presenta una tendencia definida en favor de la combinación: producción de energía eléctrica-obtención de agua dulce por electrodiálisis.

Spiegler (15-2), estudiando estos procesos de combinación o simbiosis, afirma que en las instalaciones de destilación relámpago es fácil obtener hasta 5 Kgs. de agua dulce por cada Kg. de vapor procedente de las turbinas de obtención de energía eléctrica y aumentar este rendimiento hasta cantidades del orden de 10-15 Kg. de agua dulce, si se aumenta el número de efectos o expansiones. Se considera perfectamente posible conseguir la producción de 1 m³ diario de agua dulce, como subproducto, por cada 1,20 Kw. de potencia instalada. Resulta interesante establecer si la cantidad de agua así obtenida será suficiente para cubrir las necesidades de los consumidores de la energía eléctrica, pero nos encontramos con que las necesidades de agua varían extraordinariamente con el tipo de comunidad que se considere. En países muy industrializados se debe contar con cifras de producción de energía eléctrica del orden de 0,75 Kw. per capita. Esto da una capacidad de producción de 0,62 m³ de agua dulce por persona y día, que es casi el doble de la que se considera necesaria para atender a los usos domésticos, pero que no llegaría a cubrir ni la sexta parte de las necesidades, si se incluyesen además las cantidades necesarias para los usos industriales, en un país con el grado de industrialización indicado.

Por ello, la cantidad de agua que pueda obtenerse así es insuficiente y de no disponer de otras aportaciones se tendrán que aplicar todas las medidas de economía posibles, tales como el uso repetido o reciclado, el uso directo de las aguas salinas en todos los casos en que sea posible, etc.

Desde luego, indica Spiegler, no hay la menor esperanza de que el agua obtenida como subproducto de las instalaciones ordinarias de obtención de energía eléctrica pueda ser suficiente para llegar a atender a las necesidades agrícolas.

El precio conseguido para el agua llega a ser de una cuarta a una octava parte del correspondiente a instalaciones de desalado que hubieran de comprar o producir el vapor con independencia del proceso de obtención de energía eléctrica.

Sin embargo, existen otras posibilidades basadas en la obtención de energía mediante reactores nucleares. Los reactores nucleares presentan problemas cuya resolución puede lograrse, al menos en parte, mediante asociación con los procesos de conversión de aguas salinas, los que a su vez resultan beneficiados por el aprovechamiento de la energía nuclear.

Es bien sabido que la explotación de esta nueva fuente de energía, vital en el futuro por las reservas extraordinarias disponibles, tropieza con una serie de dificultades tales como los problemas de corrosión, que plantean inconvenientes para el funcionamiento de los reactores a temperaturas elevadas, lo que a su vez se refleja en el rendimiento de obtención de energía eléctrica o en la producción de grandes cantidades de calor a bajas tempera-

turas, que son difíciles de almacenar y aprovechar. Otro problema típico es el planteado por el almacenamiento de grandes cantidades de productos de fisión, peligrosos por su radiactividad y que hay que conservar durante períodos de tiempo muy dilatados (superiores en ocasiones a mil años) en condiciones de seguridad.

La posibilidad del uso de los isótopos radiactivos, como fuente de energía para la obtención de aguas dulces a partir de aguas salinas, permitiría dar una aplicación a las cenizas que quedan en los elementos agotados de los reactores. Teóricamente el costo de este material es nulo.

Por otra parte, como los residuos radiactivos son una fuente de calor de vida larga y comportamiento previsible según leyes matemáticas, constituyen una fuente de energía muy simple, puesto que además pueden transferir su energía calorífica al agua salina sin necesidad de superficies extrañas de transmisión de calor.

Por ello, las esperanzas de su aprovechamiento, bien siguiendo técnicas de lecho fluidizado con los residuos encapsulados, o disponiendo los residuos en barras que actúen como elementos calefactores en procesos tales como la destilación, son grandes.

No obstante, a pesar de las innegables ventajas que ofrecen estas fuentes de energía, como los residuos radiactivos tienen que ser sometidos muchas veces a manipulaciones antes de su uso, se producen gastos que impiden que dichas fuentes puedan considerarse gratuitas. Welt (15-3) describe el proyecto *Artesia* para la utilización de los residuos radiactivos que quedan en las disoluciones ácidas procedentes de los tratamientos químicos a que se someten las cenizas de los combustibles nucleares. Estas disoluciones pueden transformarse en residuos sólidos, más fáciles de almacenar y que ofrecen la posibilidad de aplicarlos como fuentes de energía térmica. El proyecto, que abarca todos los aspectos técnicos y económicos del proceso de desalado, establece para el combustible nuclear un precio del orden del que tiene el fuel-oil, si bien el agua obtenida por conversión resultará a unos 0,79 \$/1000g (unas 12 ptas./m³). Además habría que contar con la economía producida en los gastos de conservación de los residuos radiactivos en disolución.

Si a estas posibilidades de beneficio mutuo se añaden otras, las ventajas que pueden alcanzarse son tales que han conducido al estudio de reactores nucleares de dimensiones muy grandes, como posibles sistemas de obtención de aguas dulces a precios mucho más bajos que los logrados hasta la fecha por los demás métodos.

En "Nucleonics News" (diciembre de 1962) (15-4), se describen las características de los proyectos del Oak Ridge National Laboratory (ORNL) sobre la posibilidad de construcción de reactores nucleares gigantes para

aplicarlos al desalado de aguas salinas. Estos reactores producirán entre 2.000 y 25.000 Mwth y los mayores serían capaces de producir agua en cantidad suficiente para atender a todas las necesidades de una ciudad de cuatro millones de habitantes. Los mayores reactores proyectados hasta la fecha indicada eran de 1.008 Mwth. Se cree que con tales reactores sería posible reducir el precio del agua hasta 10 a 20 centavos por 1.000 g. (1,50 a 3,00 ptas./m³), inferior a todos los conseguidos hasta la fecha.

El proyecto se basa en el axioma de ingeniería nuclear de que, cuanto mayor es un reactor, tanto menor es el precio de la unidad de electricidad o calor obtenidos, y en la existencia de una serie de circunstancias favorables tales como:

a) Disponer de un mercado seguro para las grandes cantidades de calor producidas en los reactores.

b) Eliminar los problemas planteados por la desigualdad de consumo de electricidad con sus horas punta (de consumo mínimo), dada la facilidad de almacenamiento del agua producida (mientras que la electricidad ofrece dificultades en este sentido).

c) La posibilidad de centralizar junto al mismo reactor muchas operaciones secundarias como la reelaboración de los combustibles nucleares agotados, evitando los gastos de desplazamiento de los mismos.

d) Posibilidad de disminuir las temperaturas en los reactores que hayan de producir agua dulce, con ventajas en cuanto a los materiales estructurales, problemas de corrosión, etc.

e) Los reactores de estas dimensiones producirían calorías tan baratas que podrían utilizarse para obtener entre 2 y 2,5 millones de kilowatios hora, como subproducto, y la venta de esta energía eléctrica, contribuiría a abaratar la conversión.

Los cálculos fundamentales correspondientes han sido realizados por Hammond (15-3), y han permitido llegar a la conclusión de que el precio del agua dulce obtenida cae bruscamente al aumentar el tamaño de los reactores, llegando a alcanzar ventaja sobre el precio del agua obtenida mediante el uso de fuentes tradicionales de energía, cuando se llega a la producción de 378 millones de litros por día, correspondiente a un reactor de 2.500 Mwth.

La siguiente tabla deducida del artículo de Hammond, contiene una comparación entre los precios del agua obtenida mediante diferentes instalaciones, según su capacidad de producción y el tipo de combustibles utilizados:

Capacidad de la instalación en m ³	47.10 ³	378.10 ³	3780.10 ³
	c.t. c.n.	c.t. c.n.	c.t. c.n.
Precio del agua dulce en ptas./m ³	10 17	9,50 5,50	9,25 2,50
(c.t. = combustible tradicional; c.n. = combustible nuclear)			

EL AGUA, PROBLEMA DE NUESTRO TIEMPO

Si llegan a construir los reactores proyectados y se confirman las extrapolaciones en que se basan los resultados previstos, se llegaría a alcanzar la tan anhelada meta de obtener agua dulce a partir de agua del mar, o de aguas salinas, a un precio suficientemente bajo para poder atender a todos los usos domésticos, industriales y agrícolas en las zonas costeras o en las suficientemente próximas a yacimientos de aguas salinas.

Tengo la esperanza de que lo expuesto justifique el que no tengamos dudas acerca de la vitalidad permanente de la Ciencia, cuando trata de ahondar sus raíces hasta lograr la satisfacción de nuestros más profundos anhelos y necesidades.

Lo que se ha conseguido constituye un estímulo para proseguir el camino con auténtica seguridad de que no está a la vista el día en que el reto lanzado a la Ciencia y a la Técnica deje de ser recogido por falta de eco en el corazón de los hombres.

Como escribiera Conrad, en cualquier actividad humana, realizada con ánimo de alcanzar los más delicados matices de la perfección, existe algo que está más allá —un sutil e inconfundible toque de amor y orgullo que va mucho más lejos que la mera habilidad; casi una inspiración que da a todo el trabajo aquel acabado perfecto que hace que sea casi un arte— que es un arte.