Instalación desaladora de agua de mar de Dhekelia (Chipre). Diseño, construcción y puesta en servicio de la planta de ósmosis inversa de 20.000 m^3/día

J. ECHANIZ (*); A. RODERO (**); O. SALLANGOS (***); F. J. SANTAMARÍA (*)

RESUMEN La República de Chipre, situada en el extremo oriental del Mar Mediterráneo, ha sido asolada en los años recientes por la sequía y la escasez de agua. Durante 1995, la isla experimentó el índice pluvial más bajo en muchos años, y los niveles de agua en depósitos y embalses descendieron hasta aproximadamente un tercio de su capacidad.

Durante varios años, el gobierno ha estado considerando la desalación de agua de mar como solución a sus continuos cortes de agua. En 1995, las autoridades solicitaron ofertas de plantas que utilizasen una de estas dos tecnologías de desalación: la compresión mecánica de vapor o la ósmosis inversa.

La solicitud de ofertas requería que los ofertantes garantizasen el funcionamiento de la planta y los costes totales del agua durante un período de explotación de 10 años. Las especificaciones de la planta de desalación exijían una producción de 20.000 m^3/día (ampliable a 30.000 m^3/día) que produciría agua potable cumpliendo las normas de la Unión Europea, y sería de propiedad privada y financiada por empresas particulares durante un período de hasta diez años (proyecto BOOT). En enero de 1996, el Departamento de Desarrollo del Agua del Ministerio de Agricultura, Recursos Naturales y Medio Ambiente, contrató una planta de ósmosis inversa de 20.000 m^3/día al Contratista General Chipriota, Caramondani Bros Ltd. en asociación con la empresa española Cadagua.

La planta de O.I. está situada en el extremo suroriental de la Isla, en Dhekelia, cerca de Larnaca. Con una toma abierta de mar, esta planta consta de cuatro trenes de Osmosis Inversa de 5.000 m^3/día, que funcionan con permeadores B10T Twin DuPont con una tasa de conversión del 50% y una presión de alimentación máxima de 82,7 bar.

Este documento expone los detalles más relevantes relativos al diseño, la construcción, la puesta en marcha y la puesta en servicio de la planta.

SEA WATER DESALTING INSTALLATION OF DHEKELIA (CYPRUS). DESIGN, BUILDING AND STARTING UP OF THE REVERSE OSMOSIS PLANT OF 20.000 M^3/DAY

ABSTRACT *Cyprus Republic, placed al the east side of the Mediterranean sea, has been devastated in recent years by draught and water scarcity. During 1995, the island went through the lowest pluvial index in many years, and the water levels in reservoirs and dammings went down to the third part of their capacity aproximately.*

For several years, government has been considering water desalinization as a solution to the continous cuttings. In 1995 authorities asked for offers of plants using one of these two desalting techniques: steam mechanical compression or reverse osmosis.

Offers solicitude required the offerers to guarantie plant work and water cost for a period of exploitation of ten years. Desalinization plant specifications demanded 20,000 m^3/day production (expandeable to 30,000 m^3/day) suiting the UE normative, they'll be privated and particurally financed for a period of even ten years (BOOT project). In january 1996, development department of the agriculture minister, natural resources and environment, contracted a reverse osmosis plant of 20,000 m^3/day to the Cyprus general contracter, Garamondani Bros Ltd. in association with the spanish firm Cadagua.

Reverse osmosis plant is al the south east end of the island, in Dhekelia, near Larnaca. With an open sea taking, this plant has four reverse osmosis trains of 5,000 m^3/day, that work with B10T Twin DuPont permeators with a 50% conversion and feeding maximum pressure of 82.7 bar.

This document exposes desing most relevant aspects, building, starting, and entering to service of the plant.

Palabras clave: Mediterráneo; Sequía; Pluvial; Embalses; Depósitos; Compresión de vapor; Osmosis inversa; Permeador.

INFORMACIÓN SOBRE EL EMPLAZAMIENTO

La Instalación Desaladora de Dhekelia está situada a unos 800 metros al este de la Central Eléctrica de Dhekelia dentro de los límites del área de la Base Soberana de Dhekelia.

(*) Cadagua, Bilbao, España.

(**) Cadagua, Larnaca, Chipre.

(***) Grupo Caramondani, Nicosia, Chipre.

La planta está formada por en una Estación de Bombeo de Agua de Mar (SWPS) y una Planta de Desalación de Agua de Mar (SWDP). Este emplazamiento principal está situado a unos 400 m. al norte de la SWPS situada ésta en la línea litoral. Véanse las figuras 1 y 2).

El área de emplazamiento de la SWDP, el depósito de agua producida del Cliente y la estación de bombeo de agua producida se encuentran en una zona de ligera pendiente, con una elevación de 17 a 19 metros por encima del nivel del mar.

FIGURA 1. Estación de la Toma de Agua de Mar.

FIGURA 2. Planta Desaladora de Agua de Mar.

Habida cuenta de la preocupación del contratista por la protección del medio ambiente, se contrataron los servicios de un especialista. Este especialista recomendó ciertos procedimientos de protección ambiental de acuerdo con la legislación chipriota, y se pusieron en práctica todos ellos. Como resultado, se garantiza que la Planta Desaladora de Dhekelia no tendrá ningún impacto negativo sobre el medio ambiente.

CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

ANÁLISIS DEL AGUA DE MAR

De acuerdo con los Pliegos de Bases, la composición química del agua de mar y otras características se muestran en la tabla 1.

Parámetro	Unidades	Valores
Calcio	mg/l como Ca^{++}	440
Magnesio	mg/l como Mg^{++}	1.540
Sodio	mg/l como Na^{+}	11.859
Potasio	mg/l como K^{+}	520
Hierro	mg/l como Fe^{+}	0,2
Manganeso	mg/l como Mn^{++}	0,02
Bicarbonato	mg/l como HCO_3	160
Sulfato	mg/l como $SO4^{=}$	2.900
Cloruro	mg/l como Cl	21.800
Nitrato	mg/l como NO^3	1
TDS	mg/l	39.220
pH		7,90
TH	ppm como $CaCO^3$	7.430
Temperatura	° C	18 - 24

TABLA 1. Características del Agua de Mar.

TOMA DE AGUA DE MAR

Los Pliegos de Bases incluían un estudio de las investigaciones realizadas sobre pozos playeros a lo largo de la costa próxima a la ubicación de la planta. Desafortunadamente, el estudio mencionado no aseguraba en absoluto una toma de pozo de playa, lo cual hubiese sido deseable para una planta de ósmosis inversa de agua de mar, dado que la geología del terreno no presentaba un aforo conveniente.

El plazo de construcción era muy corto y, por tanto, no había tiempo para estudios más detallados; por consiguiente, el contratista optó por una toma abierta de agua de mar.

CALIDAD DEL AGUA POTABLE

El agua producida por la planta deberá ser de alta calidad y ajustarse a las normas vigentes sobre agua potable de la CEE, Directiva Nº 80/778/EEC de 15 de julio de 1980. En particular, la calidad del agua deberá cumplir la especificación que se muestra en la tabla 2.

CANTIDAD DE AGUA POTABLE

La capacidad nominal de la planta desaladora deberá ser de 20.000 m^3 por día de producto, con previsiones para aumentar su capacidad hasta 30.000 m^3 por día.

SOLUCION TÉCNICA

La tecnología de la Osmosis Inversa (OI) fué el proceso elegido por el contratista para la desalación.

Se estudiaron los dos parámetros de funcionamiento más relevantes del proceso OI (la tasa de conversión y la presión máxima de alimentación en las membranas) considerando las condiciones del diseño: (I) las características de la toma y del agua de mar, (II) la calidad del agua potable requerida y (III) una salinidad máxima permitida del permeado inferior a 350 mg/l (para un agua potable de TDS < 500 mg/l y TH igual a 100-150 ppm como CO3Ca). En base al estudio económico de los costes de inversión y de explotación, la solución técnica elegida satisface las condiciones siguientes:

- Permeadores DuPont Modelo Nº 6880T B-10 Twin
- Tasa de conversión global = 50%
- Simple paso en dos etapas (1:1)
- Presión de alimentación máxima (para la temperatura de diseño al final de un período de 10 años) = 1.200 psi (82,7 bar).

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta comprende cuatro etapas de proceso principales: Sistema de Toma de Agua de Mar, Sistema de Pretratamiento, Sistema de Osmosis Inversa (OI) y Sistema de Agua Producida. El diagrama del proceso se muestra en la figura 3.

0. La Calidad del Agua Potable deberá ajustarse a la Directiva del Consejo de la CEE Nº 80/778/EEC (15 de julio de 1980) y, en particular, a:	
I. Parámetros Organolépticos	
Turbidez	0,2 NTU, antes de la adición de cal
Color	menos de 5 unidades Hazen (Pt/Co)
Olor y sabor	nulo
II. Parámetros Físico-químicos	
Temperatura	inferior a 25° C
pH	7,8 - 8,0
Indice Langellier	positivo
Alcalinidad	no menos de 30 ppm como HCO3
Sólidos Disueltos Totales	menos de 500 ppm
Cloro Residual Libre	no menos de 0,2 ppm
Dureza Total	de 100 a 150 ppm como CaCO3
Oxígeno Disuelto	no menos del 60% de saturación
III. Constituyentes Indeseables: Niveles máximos permisibles	
Nitrato ($NO3^-$)	50 ppm
Nitrito ($NO2^-$)	0,1 ppm
Amoníaco ($NH4^+$)	0,5 ppm
Oxidabilidad a 27° C durante 4 h con KMnO4 (O2)	5 ppm
Carbono Orgánico Total (C)	3 ppm
Boro (B)	1 ppm
Hidrocarburos	10 ppb
Fenoles (C6H5OH)	0,5 ppb
Aceite, grasa	10 ppb
Compuestos Activos de Superficie	0,2 ppm

TABLA 2. Calidad del Agua Potable.

SISTEMA DE TOMA DE AGUA DE MAR

El fondo del mar fue estudiado por un subcontratista marino especializado, a lo largo de 800 mm desde la línea de costa. El sistema de toma de agua comprende un conducto submarino de 1200 mm de diámetro y 500 metros de longitud. La profundidad mínima del agua en el punto de toma es de 9 metros.

Esta tubería de agua de mar termina en el edificio SWPS. El agua de mar pasa a través de unas rejas estáticas y tres canales equipados con compuertas y cribas oscilantes para separar las materias gruesas en suspensión.

Para controlar la actividad biológica y proteger el conducto de agua de mar contra las incrustaciones biológicas, se añade un biocida en la toma de agua de mar. A estos efectos, se utiliza la cloración discontinua como nueva tecnología para controlar el ensuciamiento biológico. El NaOCl es generado in situ por dos electroclorinadores de 450 Kg de cloro/día/unidad (1 en servicio + 1 de reserva).

El agua de mar se bombea a la Planta Desaladora de Agua de Mar (SWDP) utilizando 3 bombas centrífugas de cámara partida (2 en servicio + 1 de reserva), incluyendo un sistema de succión autónomo o bomba de cebado.

SISTEMA DE PRETRATAMIENTO

El propósito del pretratamiento es eliminar o reducir al mínimo el potencial de ensuciamiento del agua de alimentación a las membranas. En consecuencia, para proporcionar unas condiciones de funcionamiento seguras a la planta de OI, se han considerado siete etapas de tratamiento previo.

Adición de cloro

Adición de cloro para controlar la actividad biológica según se describe anteriormente.

Coagulación-floculación en línea

Se inyectan coagulante (FeCl3) y polielectrolito en la tubería de descarga (DN 700) para la floculación y la estabilización de cualquier materia particulada, coloidal y fina en el agua de mar. La adición de ácido sulfúrico y un mezclador estático aseguran la floculación adecuada.

Filtros Bicapa

Para eliminar los sólidos suspendidos y reducir la concentración de coloides (SDI), el agua de mar floculada se filtra a través de seis filtros de gravedad, de lecho doble a un régimen nominal de 6,6 $m^3/h/m^2$. El lecho filtrante comprende gravilla, arena y antracita.

El filtrado se recoge a través de un distribuidor de desagüe inferior y fluye por gravedad al tanque de agua de contralavado (300 m^3) y, a continuación, se desagua al tanque de agua de mar filtrada (400 m^3). El lavado por contracorriente de los filtros se efectúa utilizando agua de mar filtrada en un flujo inverso (a 33 $m^3/h/m^2$) con agitación previa por aire (a 54 $m^3/h/m^2$) mediante dos soplantes (1 en servicio + 1 de reserva).

Se utilizan cinco bombas de cámara partida horizontal (4 en servicio + 1 de reserva) para bombear el agua de mar filtrada a los filtros de cartuchos. También hay tres bombas (2 en servicio + 1 de reserva) para la ejecución del lavado por contracorriente de los filtros bicapa.

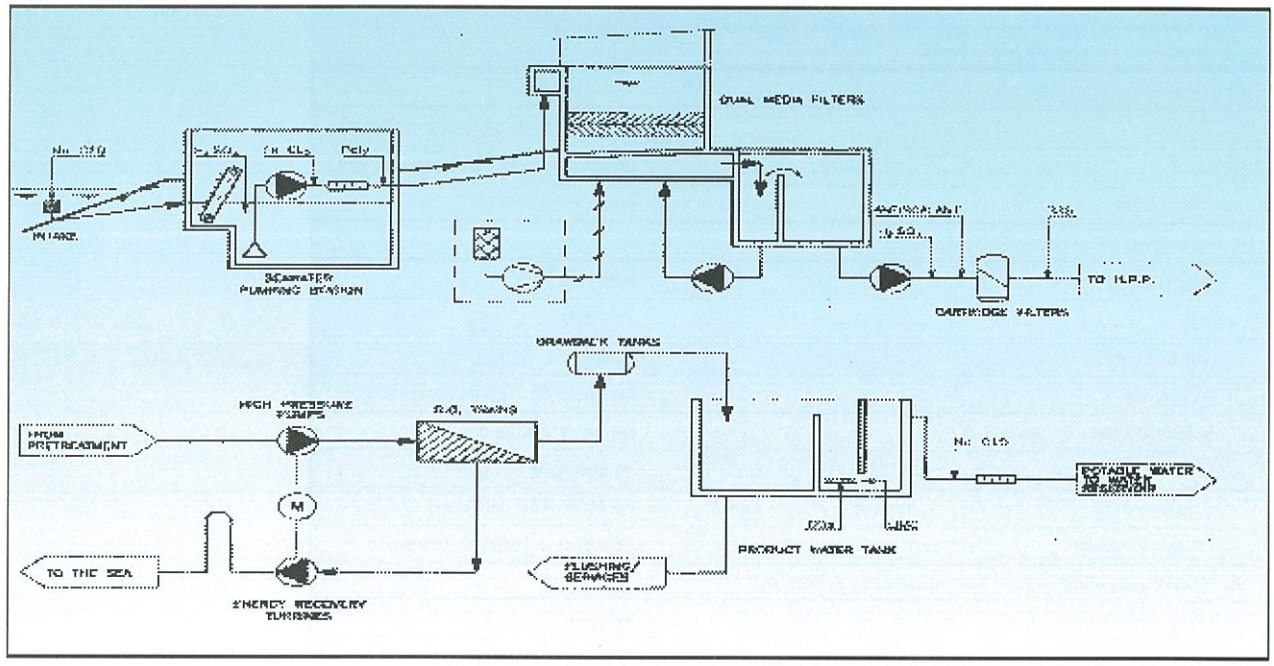

FIGURA 3. Diagrama del proceso.

Adición de Acido

Para impedir las incrustaciones de carbonato cálcico y controlar el pH del agua de alimentación, se dosifica ácido sulfúrico aguas arriba de los filtros de cartuchos. La dosis será la requerida para hacer descender el pH a 6,9.

Adición de Antiincrustante

El agua de mar acidificada se dosifica junto con un dispersante, como inhibidor de la incrustación para sales poco solubles, tales como CaSO4, BaSO4, SrSO4 y CaF2. El antiincrustante utilizado debe ser compatible con las membranas y el agua potable.

Filtros de Cartuchos

El agua de mar filtrada y acondicionada se filtra a través de siete filtros de cartuchos (6 en servicio + 1 de reserva) para garantizar que no llegue al sistema de OI ninguna partícula con un diámetro superior a 5 micras y proteger así las bombas de alta presión y las membranas de ósmosis inversa. Cada filtro contiene un conjunto de cartuchos enrollados de polipropileno, con un grado de filtración nominal de 5 micras. Véase la figura 4.

Decloración

Aguas abajo de los filtros de cartuchos, se dosifica el agua de mar con bisulfito de sodio para impedir el ataque a las membranas de OI por el cloro libre en el agua pretratada. El punto de dosificación de bisulfito de sodio (SBS) está ituado en el colector de succión de las bombas de alta presión, reduciendo en consecuencia el crecimiento biológico al máximo, después de la decloración.

SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA

La misión del Sistema de OI es producir agua desalada a partir de agua de mar. Este sistema consta principalmente de cuatro etapas de proceso diferentes.

Grupos de Alta Presión (4 en servicio + 1 de reserva)

El agua de mar se presuriza utilizando bombas de alta presión y es alimentada a los Trenes de OI para la desalación. La salmuera se devuelve a las turbinas y así la energía sobrante se recupera antes de la descarga al mar.

Cada bomba de alta presión (HPP) está diseñada para impulsar 420 m^3/h y generar 82 bar, absorbiendo 1.164 KW. Por otra parte, cada turbina de recuperación de energía (ERT) está diseñada para admitir 210 m^3/h y 78 bar de altura manométrica con un factor de recuperación del 29%, equivalente a 341 KW. La presión disponible en la succión de las bombas permitirá que los Trenes de OI funcionen con una presión de alimentación máxima de 82,7 bar.

Ambas máquinas son centrífugas, multietápicas, de doble voluta, y partidas horizontalmente. El Grupo es accionado por un motor eléctrico de 1000 KW, con un acoplamiento de embrague entre el motor y la turbina. Véanse las figuras 5 y 6.

Trenes de Ósmosis Inversa

El agua de mar presurizada se alimenta a 4 Trenes de OI. Cada tren tiene una capacidad de 5.000 m^3/d y consta de 160 permeadores B10T-6880 "TWIN" DuPont como máximo, con 130 de ellos como disposición de partida y una configuración en dos etapas (65:65). Los permeadores están acoplados directamente por parejas, formando un sistema de escalonamiento de la salmuera. Cada tren funciona con una tasa de conversión del 50%, y la presión de alimentación máxima a los permeadores será de 82,7 bar. Para permitir los cambios de temperatura del agua de mar, la presión de alimentación se ajustará a través de la válvula de control de la alimentación en función del flujo de permeado.

Los permeadores B10 T DuPont han sido elegidos por varias razones:

I) La calidad del permeado se obtiene en simple paso para la conversión global óptima.

II) La membrana de tipo de poliamida se considera la más robusta.

III) La fibra fina hueca permite una alta presión de trabajo y, por consiguiente, una mejor calidad del agua y un diseño muy compacto.

FIGURA 4. Tuberías de Filtros Bicapa y Filtros de Cartucho.

FIGURA 5. Grupos de Alta Presión.

El permeado producido pasa primero a través del tanque de retroceso y, a continuación, al tanque de agua producida. Véase la figura 7.

Limpieza de las Membranas de Ósmosis Inversa

La limpieza química está dirigida a eliminar todas las impurezas atrapadas en las membranas, y tiene lugar después de un período de funcionamiento relativamente largo. El proceso de limpieza consiste en la recirculación de la solución limpiadora a gran velocidad y a través de todas las membranas.

Los componentes principales del sistema son: dos bombas centrífugas (1 de reserva), tanque de productos químicos (para la limpieza), tanque para la neutralización de residuos, tanque de almacenamiento de agua producida y filtro de cartuchos.

El agua dulce requerida para el desplazamiento de las aguas salinas y de los productos de limpieza química se tomará del tanque de almacenamiento de agua producida; es decir, la bomba centrífuga succiona para dicho fin del tanque de almacenamiento y del tanque de productos químicos, a efectos de limpieza química.

Se incluyen dos tanques en el suministro, uno para la solución limpiadora y el segundo para la recogida de efluentes. Es en este tanque donde tiene lugar el proceso de neutralización (dosificación de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio), antes de la evacuación de los efluentes a través del colector de descarga general de la planta.

Postratamientos de las Membranas de Ósmosis Inversa

Si tiene lugar una reducción del rechazo de sal de las membranas durante el funcionamiento, o si el rechazo de sal no aumenta o bien se reduce realmente después de una limpieza, los permeadores serán tratados con PVME que aumenta el rechazo de sal reduciendo el flujo acoplado.

Por norma general, los permeadores B10 deben ser tratados con Acido Tánico después de cualquier operación de limpieza. El Acido Tánico queda absorbido sobre la superficie de la membrana, lo que aumenta el rechazo de sales.

El PVME (aplicación PT-A) y el Acido Tánico (aplicación PT-B) pueden aplicarse utilizando, bien el sistema de recirculación (con el equipo de limpieza), o bien el tratamiento en línea.

SISTEMA DE AGUA PRODUCIDA

El permeado procedente de los Trenes de OI pasa al tanque de agua producida de 500 m^3 y antes de descargarse al depósito de agua del cliente es postratada para satisfacer las condiciones de calidad del agua potable que se requieren. El postratamiento consta de dos etapas diferentes, que se describen a continuación:

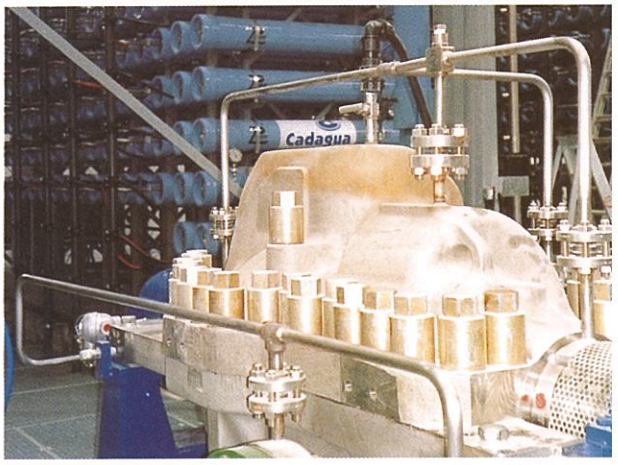

FIGURA 6. Sistema de Osmosis Inversa.

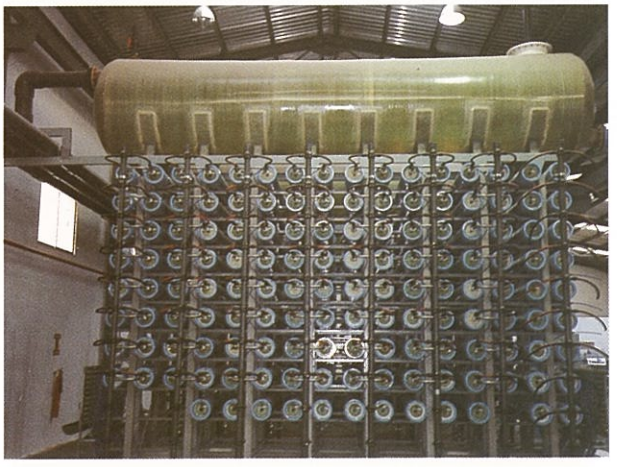

FIGURA 7. Tren de Osmosis Inversa.

Remineralización

La remineralización tiene lugar en un compartimento separado del tanque de agua producida a través del proceso de CO2 + cal, para (I) corregir el pH (hasta 7-8), (II) aumentar la dureza total (TH hasta 100-150 ppm como CaCO3) y la alcalinidad (TAC> 30 ppm como HCO3) y (III) corregir en consecuencia el Indice Langellier (LSI valor positivo).

Desinfección

El agua producida remineralizada se dosifica con hipoclorito de sodio hasta no menos de 0,2 mg/l de cloro libre, antes de entregarse al depósito de agua.

EQUIPO DE ENSAYOS

Forma parte de la planta una unidad de ensayos para prueba individual de membranas y de acuerdo con la norma ASTM D419-85. Este equipo presenta en primer lugar, la posibilidad de poner en práctica ensayos de limpieza con un sólo módulo, para evitar pruebas de limpieza con la planta a tamaño natural y, en segundo lugar, la oportunidad de perfeccionar los procedimientos de limpieza antes de iniciar una limpieza a escala natural. Otra misión del equipo de ensayo es la determinación del rechazo de sal y el flujo de producción de un único permeador en condiciones estándar.

EQUIPO DE CONTROL

Los procesos de la planta son controlados automáticamente de manera que ésta es manejada a distancia desde el puesto de mando a través de un sistema de supervisión configurado como red de comunicaciones PLC/PC redundante. No obstante, la planta está equipada también con una secuencia de puesta en marcha semiautomática.

El objetivo principal del control de la planta es poner la línea de OI en servicio de forma satisfactoria, asegurando que se pongan en marcha varias unidades del equipo, y que los parámetros del proceso alcancen sus valores respectivos, de acuerdo con el valor prefijado establecido por el operario a través del teclado del PC.

INSTALACIONES ELÉCTRICAS

El suministro eléctrico a la planta lo proporciona la Autoridad de Electricidad de Chipre (EAC). El suministro eléctrico incluye cables de alimentación subterráneos de 66 y 11 KV a su subestación, adyacente a la planta desaladora, procedentes de la cercana Central Eléctrica de Dhekelia, y alimentación por cable subterráneo de 11 KV desde dicha subestación hasta la instalación desaladora.

La planta desaladora comprende las siguientes instalaciones principales:

- Cabinas primarias de 11 KV para la SWDP y la SWPS.
- Cabinas secundarias de 11 KV para la SWPS.
- 2 cables subterráneos de suministro de 11 KV para la Estación de Bombeo de Agua de Mar (SWPS).
- Suministros de 11 KV para todas las bombas de alta presión de la Planta Desaladora de Agua de Mar (SWDP).
- Cabinas de media tensión de la SWDP y la SWDS.
- Transformadores redundantes para la SWDP y la SWPS, de 11 KV/415 V.
- Baterías en 11 KV y 415 V para la corrección del factor de potencia.
- 3 Centros de Control de Motores para los motores de 415 V.
- Líneas de distribución general de 11 KV y 415 V.

INSTALACIONES DE LABORATORIO

La planta también alberga instalaciones de laboratorio para el control de la calidad del agua producida así como el control de los filtros y el rendimiento operativo de las membranas de OI.

Se realizarán análisis de agua diarios para la medición de ciertas concentraciones de iones así como de los parámetros físicos en el agua potable.

ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES

A continuación se detalla la calidad de los materiales del equipo principal de la planta de OI.

1. Tuberías

• Conductos submarinos:	GRP
• Tuberías de agua de mar de baja presión:	GRP
• Conducto de descarga de salmuera/vertidos:	GRP
• Tuberías de agua de mar/salmuera de alta presión:	SS UNS S31254
• Mangueras flexibles:	
a) Fuelle interior:	PTFE
b) Trenzado de presión:	SS 304
c) Terminales:	SS UNS S31254
• Conectores de permeadores:	SS UNS S31254
• Tubería de ácido sulfúrico:	CS Sch. 80
• Sistemas químicos:	PVC
• Tuberías de agua de permeado:	PVC
• Tuberías de limpieza química:	GRP

Algunas características del UNS S31254, un acero inoxidable superaustenítico y de acuerdo con ASTM A312, son las siguientes:
Composición química (%): C (0,02 max.), Mn (1 max.), P (0,03 max.), S (0,01 max.), Si (0,8 max.), Ni (17,5-18,5), Cr (19,5-20,5), Mo (6-6,5), N (0,18-0,22), Cu (0,5-1).

Propiedades mecánicas:

• Resistencia a la tracción:	650 N/mm² min.
• Límite de elasticidad:	300 N/mm² min.
• Alargamiento:	35% min.

Factores de corrosión:

• Factor de "crevice" (CF):	40,2
• Resistencia a las picaduras (PRE):	44,7

Equivalentes de Cr-Ni

• Cr Eq:	26,7
• Ni Eq:	21,3

2. Válvulas

• Válvulas de mariposa de baja presión	
– Cuerpo:	DIN 1691 GG25
– Anillo Elástico:	EPDM
– Disco:	DIN 1693 GGG40 + Halar
– Eje:	AISI-420
• Válvulas de bola de alta presión:	SS UNS S31254
• Válvulas de regulación de caudal	
– Cuerpo:	SS UNS S31254
– Macho y asiento:	SS 904L + Estelita

- Válvulas de retención de disco
  - Cuerpo, asiento y discos: Duplex S327060
  - Muelle: Inconel X750

3. Bombas

- Bombas de agua de mar (agua bruta y filtrada): IR-885
- Bombas de alta presión y turbinas de recuperación de energía
  a) Carcasas y rodetes: IR-885
  b) Aros de desgaste de ejes y carcasas: NITRONIC 50
  c) Anillos de desgaste de los rodetes: WAUKESHA 88
- Bombas de Limpieza/Lavado: GRP
- Bombas de agua producida: SS, AISI-316

El IR 885 es una colada de acero inoxidable ASTM-A351 reforzado con nitrógeno.

La composición química es la siguiente (%): C (0,03 max.), Mn (0,50 Max.), P (0,04 max.), S (0,04 max.), Si (1,00 max.), Ni (10,0-14,0), Cr (20,0-23,0), Mo (3,4-4,5 N (0,10-0,20).

El factor de"crevice" es igual o superior a 35.

4. Recipientes y tanques

- Filtros de cartuchos: GRP para el material de la carcasas y PVC para los componentes internos.
- Tanques de retroceso: PRFV
- Tanques de productos químicos: PRFV
- Tanques de ácido sulfúrico: Acero al carbono
- Silo de cal/tanques de lechada de cal/ saturador de cal: Acero al carbono

CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA

El contrato fue adjudicado el 3 de enero de 1996 a la UNION TEMPORAL DE EMPRESAS (JOINT VENTURE) formada por Caramondani Bros Ltd. y Caramondani Desalination Plant Ltd. y como principal subcontratista especializado la empresa española Cadagua S.A. de España. Los documentos del contrato se firmaron el 31 de enero de 1996, estipulándose que la planta entraría en funcionamiento en un plazo de 60 semanas o el 1 de abril de 1997, un hecho que fue cumplido totalmente por los contratistas.

OBRA CIVIL

La planta que consta de una Estación de Bombeo de Agua de Mar (SWPS) y una Planta de Desalación de Agua de Mar (SWDP) para el control y el tratamiento ocupa una superficie total aproximada de 2900 m^2, que tiene entre otras áreas, talleres, almacenes, laboratorio, administración, cantina y sanitarios.

Los plazos de la obra civil fueron los siguientes:

	Semana (de - a)
• Toma de Agua de Mar	19-53
• Conductos submarinos	30-54
• Filtros y Depósitos de Hormigón	4-54
• Edificio Principal	4-36
• Edificio de Administración y Productos Químicos	35-54
• Tanque de Agua Producida	49-56
• Obras generales (carreteras, cerramiento, alumbrado, etc.)	56-60

EQUIPOS MECÁNICOS

El plazo de fabricación dado por los proveedores fue de entre 5 y 10 meses, siendo el plazo más largo para los grupos de alta presión.

El montaje mecánico comenzó la semana Nº 43 y concluyó durante la semana Nº 56.

EQUIPOS ELÉCTRICOS

Los equipos eléctricos estuvieron disponibles en el emplazamiento durante las semanas Nº 44 y Nº 50.

La instalación eléctrica comenzó la semana Nº 44 y concluyó durante la semana Nº 58.

PUESTA EN SERVICIO DE LA PLANTA

El período de puesta en servicio de la planta (de la semana 50 a la semana 59) se dividió en varias etapas:

La prioridad de verificación de los equipos se programó en base a la línea de agua de mar; es decir, la estación de bombas de agua de mar, los filtros bicapa, la estación de bombas de agua de mar filtrada, etc.

Del 15 de enero al 15 de febrero (es decir, de la semana 50 a la semana 55) se llevaron a efecto las primeras comprobaciones mecánicas y eléctricas y calibraciones de instrumentos en la SWPS. Durante la semana 55, se puso en funcionamiento la SWPS. El agua de mar se bombeó primero a la DP (Planta de Desalación) y a continuación se devolvió al mar a través del conducto de salmuera (by-pass filtros bicapa).

Durante la semana 56, se llevaron a cabo una serie de ensayos "Jar-Test" de coagulación/floculación con agua de mar para determinar la dosis de cloruro férrico adecuada y también para establecer qué tipo de polielectrolito presentaría los mejores resultados. Además, se ajustó el pH para mejorar la acción coagulante.

De la semana 55 a la semana 58, mientras la SWPS permanecía en funcionamiento, se procedió a la carga del lecho filtrante. Las distintas capas (gravilla, arena, antracita) se cargaron una tras otra y se lavaron a contracorriente de manera suficiente antes de la carga de la capa siguiente.

Durante las semanas de la 56 a la 58, la DP y el sistema de dosificación química fueron comprobados eléctrica y mecánicamente. La calibración de los instrumentos también se efectuó durante este período. Al mismo tiempo, cuando hubo disponible agua de mar filtrada en los tanques, se dieron los pasos siguientes:

- Comprobación de las posibles fugas en tuberías y bridas
- Limpieza de las tuberías
- Comprobación de enclavamientos
- Puesta en marcha de la dosificación química
- Ensayo SDI del agua filtrada
- Instalación de los elementos filtrantes en los filtros de cartuchos

Una vez efectuados los trabajos anteriores, la planta pudo conectarse a los lados de alta presión y los de baja presión de las membranas de OI y poner en marcha las bombas de alta presión. Esta fase es conocida como la puesta en marcha de la planta de desalación.

PUESTA EN MARCHA

La puesta en marcha de la planta se llevó a efecto durante la semana 59 y la primera producción de agua tratada se obtuvo en la semana 60 (1 de abril).

El 21 de marzo, se conectaron las membranas del Tren de OI Nº 1 y la bomba de alta presión correspondiente se puso en marcha el 22 de marzo.

De acuerdo con los análisis y la temperatura del agua de mar (16,5° C), los cálculos dieron como resultado una configuración inicial de 53 + 53 membranas a conectar, de las 65 + 65 instaladas para las condiciones de diseño.

Los datos de funcionamiento durante la puesta en marcha del Tren de Osmosis Inversa Nº 1 fueron las siguientes:

- Flujo de alimentación 420 m³/h
- Flujo de permeado 210 m³/h
- Tasa de conversión 50%
- Presión de alimentación 78,3 bar
- Conductividad del permeado 700 (S/cm.

El 24 de marzo, se inyectó una solución PT-B (ácido tánico) en línea, dando como resultado una conductividad del permeado de 300 µS/cm.

Habida cuenta de que la conductividad del permeado siguió siendo baja durante los días de funcionamiento siguientes, se decidió no inyectar la solución PT-A en las membranas. La puesta en marcha de los Trenes de OI Nº 2, 3 y 4 se llevó a efecto de manera similar

Tren de Osmosis Inversa Nº 2. Fecha de puesta en marcha: 23 de marzo.

- Membranas conectadas: 53 + 53
- Flujo de alimentación: 420 m³/h
- Flujo de permeado: 208 m³/h
- Tasa de conversión: 49,5%
- Presión de alimentación: 78 bar
- Conductividad del producto: 600 µS/cm.
- Fecha de inyección de PT-B: 24 de marzo
- Conductividad del permeado: 230 µS/cm.

Tren de Osmosis Inversa Nº 3. Fecha de puesta en marcha: 24 de marzo.

- Membranas conectadas: 56 + 56
- Flujo de alimentación: 416 m³/h
- Flujo de permeado: 207 m³/h
- Tasa de conversión: 49,7%
- Presión de alimentación: 76 bar
- Conductividad del permeado: 750 µS/cm
- Fecha de inyección de PT-B: 25 de marzo
- Conductividad del permeado: 210 µS/cm

Tren de Osmosis Inversa Nº 4. Fecha de puesta en marcha: 25 de marzo.

- Membranas conectadas: 56 + 56
- Flujo de alimentación: 420 m³/h
- Flujo de permeado: 211 m³/h
- Tasa de conversión: 50,2%
- Presión de alimentación: 75,7 bar
- Conductividad del permeado: 700 µS/cm
- Fecha de inyección de PTB: 26 de marzo
- Conductividad del permeado: 250 µS/cm

El 29 de marzo (semana 60) se puso en funcionamiento el postratamiento del agua producida, añadiendo (según el diseño) cal, CO2 e hipoclorito sódico.

La planta fue inaugurada el 3 de abril de 1997, por S. E. El Presidente de la República. La ceremonia contó con la presencia del Obispo de Kition y el Administrador de la Zona de Bases Soberanas de Akrotiri y Dhekelia, entre otras personalidades.

En el momento en que se hubo de presentar este documento, se estaban llevando a efecto los ensayos de rendimiento y aceptación de la planta.

CONCLUSIONES

Aunque el plazo era demasiado corto (60 semanas) para la construcción de una planta de ósmosis inversa de agua de mar con una toma de mar abierta, el proyecto se completó con éxito.

De acuerdo con las pruebas de operación, todo apunta al hecho de que se cumplirán tanto los valores de rendimiento que se establecen en el contrato como el factor de servicio de la planta.