

# Plantas de tratamiento de agua para producción de agua desmineralizada en usos industriales

**F. Javier GARCÍA CASTILLO**

Jefe Departamento de Tratamiento de Aguas  
FACSA

**Ester RENAU GIMENO**

Jefa Departamento de Servicios

**Rodrigo DUQUE HEBRERO**

Jefe Departamento de Ingeniería

**Francisco MOLINER FAS**

Departamento de Servicios

SITRA - PRODESA

**Juan PEÑALVER SOBRINOS**

Destilación y Energías

BP OIL ESPAÑA REFINERÍA DE CASTELLÓN, S.A.U.

*Las aguas para uso industrial requieren, a veces, unas calidades que no siempre están disponibles en origen, por lo que deben someterse a procesos de acondicionamiento. El tratamiento final al que se someterán será más o menos complejo en función del uso final o proceso al que se destinen.*

*Las necesidades cada vez más exigentes de calidad de agua son satisfechas, llegando a niveles de agua ultrapura.*

*Los avances en tecnología de tratamiento de aguas han llegado de la mano de los procesos de membranas, como son la Ósmosis Inversa (OI), y, más recientemente, la*

*Electrodesionización (EDI), para el pulido final del agua; tecnologías que están desplazando, cada vez más, a los tradicionales sistemas de tratamiento por resinas, y que son capaces de proporcionar agua con  $>16$  Mohm/cm.*

## Introducción

Las aguas para uso industrial requieren, a veces, unas calidades que no siempre están disponibles en origen, por lo que deben someterse a procesos de acondicionamiento. En función del proceso al que deban alimentar, la calidad exigida será diferente y el tratamiento final al que se someterá será más o menos complejo.

Para alcanzar calidades de agua similares disponemos de distintos tratamientos y el elegir el más correcto para nuestras necesidades no es tarea fácil, si bien para determinados procesos industriales se están estandarizando los esquemas de tratamiento para las aguas.

En las plantas térmicas para generación de energía eléctrica uno de los componentes fundamentales es el equipo de generación térmica. También existen muchos procesos industriales que usan este equipo como generador de vapor. El agua para alimenta-

ción a estos equipos requiere de una calidad especial y el tratamiento de ésta es fundamental para asegurar una larga vida útil de los mismos. El objetivo de este tratamiento es prevenir posibles corrosiones e incrustaciones. También se requiere agua de alta calidad para el control de emisiones en la combustión.

Los avances en tecnología de equipos de vapor, unidos a los del tratamiento del agua, han hecho que las necesidades cada vez más exigentes de calidad de agua para aporte a los mismos puedan ser satisfechas, llegando a niveles de agua ultrapura. Los avances en tecnología de tratamiento de aguas antes mencionados han llegado de la mano de los procesos de membranas, como son la OI, con la combinación de dos pasos, y, más recientemente, la EDI, para el pulido final del agua. Estas tecnologías están desplazando, cada vez más, a los tradicionales sistemas de tratamiento por resinas.

Los actuales sistemas de desmineralización con tecnología EDI son capaces de proporcionar agua con 16 Mohm/cm ( $<0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Un sistema tipo de instalación de este tipo integraría:

- Pretratamiento: puede incluir filtración sobre lecho, filtración sobre carbón activo, pretratamiento químico y filtración sobre cartuchos.
- OI en doble paso.
- Eliminación del  $\text{CO}_2$  del permeado mediante desgasificador.
- Electrodesionización para alcanzar la calidad final en el agua desmineralizada.

Entre las numerosas ventajas que proporcionan estos sistemas frente a los tradicionales de resinas, podemos destacar las siguientes:

- eliminación del uso de regenerantes químicos,
- eliminación de aguas residuales procedentes de la regeneración y su tratamiento,
- operación simple y continua,
- bajo consumo energético,
- agua de calidad constante y sin fluctuaciones de caudal, y
- reducido espacio de implantación.

### Objeto

En este artículo se describe de forma detallada el sistema de tratamiento de agua por el proceso de OI y EDI como parte integrante del proyecto de la *Cogeneración IV* que BP Oil realizó en su refinería de Castellón. En el citado proyecto se requiere agua de excelente calidad para inyección en la cámara de combustión de la turbina de gas para el control de emisiones. Dicho sistema de tratamiento ha sido diseñado, construido, instalado y operado por *Sitra-Prodesa*, empresa de ingeniería de aguas dedicada al ámbito industrial y perteneciente a *Facsá*. También se muestran los resultados de operación y rendimientos de la instalación durante los tres años de servicio.

El sistema de tratamiento de aguas está formado básicamente por una unidad de producción de agua desmineralizada. Dicha planta asegura un caudal continuo de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  en las calidades requeridas

y con una disponibilidad del 99% del tiempo.

Las calidades de agua de entrada al proceso, proveniente de pozos de la zona, y agua objetivo desmineralizada, son las que se muestran en la *tabla 1*.

### Descripción de la instalación

El sistema de tratamiento adoptado para el proyecto de desmineralización de las aguas de aporte a la cogeneración está compuesto por cuatro fases perfectamente identificadas, que son:

- pretratamiento,
- tratamiento de OI,
- tratamiento por electrodesionización, y
- efluentes.

Como características generales de la instalación tenemos que los equipos de filtración y grupos

de bombeo están duplicados como medida de seguridad y para asegurar un factor de uso y disponibilidad lo más elevado posible.

En el caso de los grupos de bombeo, éstos están diseñados en forma de  $2 \times 100\%$ , esto es, que una sola bomba es capaz de dar todo el caudal y presión de diseño mientras que la otra permanece de reserva. Ambas se alternan por parada y por fallo térmico. Trabajan a presión constante mediante transmisor de presión instalado en la tubería de impulsión y que cierra un lazo de control con un variador de frecuencia instalado en el cuadro CCM (Centro de Control de Motores), siendo estas señales de presión redundantes.

La instalación se encuentra montada sobre bastidores interconectados entre sí, lo que facilita su montaje inicial y un posible cambio de ubicación a futuro, además de reducir la superficie de implantación.

PARÁMETROS	UNIDADES	AGUA ENTRADA	AGUA DESMINERALIZADA
Temperatura	°C	15-25	
pH			5-9
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1.450	$<0,2$
TSS	mg/L		0
TDS	mg/L	1.035	$<0,1$
Turbidez	NTU	0,5	
Dureza total	mg/L $\text{CaCO}_3$	650	$<1$
Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )	mg/L $\text{CaCO}_3$	444	
Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )	mg/L $\text{CaCO}_3$	206	
Alcalinidad	mg/L $\text{CaCO}_3$	260	
Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ )	mg/L	334,3	
Sílice	mg/L	15	$<0,2$
Sodio ( $\text{Na}^+$ )	mg/L	149 (como $\text{CaCO}_3$ )	$<0,01$
Potasio ( $\text{K}^+$ )	mg/L		
Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )	mg/L	110 (como $\text{CaCO}_3$ )	
Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	mg/L	320 (como $\text{CaCO}_3$ )	$<0,003$
Hierro	mg/L	0,2	$<0,02$
Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )	mg/L	274 (como $\text{CaCO}_3$ )	
Cobre (Cu)	mg/L		$<0,003$
Aceite	mg/L		ND
Materia orgánica	mg/L $\text{O}_2$	0,97	
Permanganato ( $\text{KMnO}_4$ )	mg/L		$<5$

Tabla 1. Calidades de agua.

## Pretratamiento

El pretratamiento en la instalación de desalinización tiene como objetivo el proteger a las membranas de incrustaciones y precipitaciones de sales (químico) y de partículas y sólidos suspendidos (físico). El diseño del pretratamiento es importante para garantizar una vida útil de las membranas prolongada, evitando todo tipo de ensuciamientos.

A continuación se describen brevemente las actividades llevadas a cabo durante esta etapa de pretratamiento:

### Depósitos y bombeos

El agua procedente de pozo se acumula en el depósito de inicio, de una capacidad de 15 m<sup>3</sup>. De él aspiran dos grupos de bombeo, a saber, bombeo de inicio y bombeo de lavado de filtro.

### Filtración multimedia

Posteriormente, el agua pasa a través del filtro multimedia, de disposición cilíndrica vertical y lecho de arena silíceo y de antracita. De esta forma tendremos una capa dual favoreciendo la eliminación, tanto de coloides como de materia orgánica. La actuación de las válvulas de sus frontales es automática.

El lavado del filtro se lleva a cabo automáticamente, teniendo en cuenta el tiempo de funcionamiento y la caída de presión en el mismo, mediante agua bruta a contracorriente. Se disponen dos filtros en paralelo diseñados 2 x 100%, para un caudal unitario de 12 m<sup>3</sup>/h, de manera que se alternan cuando el filtro que está en proceso necesita su regeneración.

### Dosificación de antiincrustante

Con el fin de prevenir la precipitación de sales poco solubles, como pueden ser el sulfato cálcico y el sulfato de bario, se añade una cantidad adecuada de agente antiincrustante.

El equipo dosificador de antiincrustante está compuesto por un depósito con interruptor de nivel mínimo con alarma, una bomba dosificadora, tuberías de conexión y válvulas.

### Microfiltración de seguridad

El agua tratada, antes de ser enviada a los módulos de membranas se filtra sobre cartuchos bobinados de polipropileno con una capacidad de retención de 5 µm. Con esto se consigue un afino del agua a tratar, evitando la llegada de cualquier tipo de partícula sólida de tamaño superior a la membrana. Para ello, se instala un contenedor en acero inoxidable para alojar siete unidades de cartuchos de 40" de longitud y 5 µm.

Del mismo modo que la filtración primaria, ésta se diseña 2 x 100%, así cuando sea necesaria la sustitución de los filtros de cartucho desechables solo habrá que girar un juego de válvulas instaladas para tal efecto by-passando el caudal por el filtro que se encuentre operativo en cada momento.

Un juego de transmisores de presión situados en las líneas de filtración nos da la indicación de la presión previa y posterior a los mismos. La diferencia entre ambos nos da la alarma para proceder a la sustitución o limpieza de los filtros.

La *figura 1* muestra una parte de los equipos que conforman el pretratamiento descrito anteriormente.

## Tratamiento por OI

Las características analíticas del agua bruta de aportación recomiendan un tratamiento de ésta mediante técnicas de separación por membranas semipermeables de OI. Este proceso se basa en el paso de agua a través de una membrana semipermeable rechazando gran parte de las sales disueltas.

Para conseguir este fenómeno, se debe introducir en el contenedor de las membranas agua a una presión superior a la presión osmótica del agua de aporte. Una vez superada esta presión, el flujo de agua permeada es proporcional a la presión en exceso aplicada.

### Bombeo de alta presión

Se utiliza una bomba centrífuga multietapa con eje y rodetes en acero inoxidable AISI-316. El grupo de bombeo de alta presión se diseña igualmente según las características antes mencionadas.

### Ósmosis Inversa

Éste es el punto en que se produce la desalinización del agua de aporte por medio del proceso de ósmosis.

Las membranas elegidas son de configuración espiral y de tipo composite. La capa activa es de



Figura 1. Vista parcial del pretratamiento.

poliamida aromática sobre soporte de polisulfona que, a su vez, es soportado mecánicamente por un tejido no tejido de poliéster. Son membranas de bajo ensuciamiento, con carga neutra sobre su superficie.

Debido a las necesidades específicas de la etapa posterior a la ósmosis, *Sitra-Prodesa* diseña un sistema de OI de dos pasos, intercalando una torre de desgasificación o *stripping* para eliminación del  $\text{CO}_2$ . En base a los cálculos de incrustación realizados, se adopta como conversión global de diseño el 76,2%, es decir, se produce un caudal de permeado del 76,2% del caudal de aporte y se vierte un rechazo cuyo caudal es el 23,8% del mismo.

El primer paso se realiza en dos etapas, dando como resultado un producto bajo en sales pero con un contenido sustancial en  $\text{CO}_2$ . El rechazo se desestima completamente y es enviado al depósito de efluentes. Se adopta como conversión de diseño el 80%. La producción de este paso es de 11,25  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Para dar más seguridad a la instalación y evitar el efecto negativo del  $\text{CO}_2$ , se instala una dosificación de sosa cáustica en línea previa al segundo paso que mantendrá un pH constante a la entrada de éste.

El equipo dosificador de sosa está compuesto por un depósito con interruptor de nivel mínimo con alarma, una bomba dosificadora, tuberías de conexión y válvulas.

El segundo paso de la ósmosis se realiza en una etapa, obteniendo como permeado un agua con una conductividad inferior a 15  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , calidad más que suficiente para que funcione correctamente la etapa de electrodesionización. Se adopta como conversión de diseño el 80%. El rechazo del segundo paso se recircula al 100% sobre dos puntos, un 70% de dicho rechazo se lleva a la entrada y un 30% del mismo a la entrada del segundo paso. La producción de este paso es de 9  $\text{m}^3/\text{h}$ . Este paso se realiza también a presión constante y mediante un grupo de bombeo diseñado igual que el anterior.

En la *figura 2* se muestra parte del sistema de membranas descrito.



Figura 2. Vista parcial del sistema de ósmosis inversa.

#### Torre de desgasificación o stripping

Debido al alto contenido en  $\text{CO}_2$  se instala una torre de desgasificación entre los dos pasos de la ósmosis. Ésta hace dos funciones; por un lado desgasifica el contenido de  $\text{CO}_2$  del agua en este punto y, por otro, sirve de pulmón para el bombeo al segundo paso de la ósmosis.

Se coloca un sensor de transmisión de nivel que nos da la lectura en línea de la capacidad del tanque de la torre y que habilita las bombas de impulsión de alta presión al segundo paso.

Se trata de desgasificar el  $\text{CO}_2$  producido en el paso uno de la ósmosis mediante el desplazamiento con aire atmosférico en un flujo a contra corriente provocado por un ventilador.

Se dota a la torre con un depósito de 1.500 l de capacidad que sirve de pulmón para el rebombeo del permeado del primer paso al segundo.

#### Equipo de desplazamiento o flushing

Para evitar el ensuciamiento de las membranas por precipitación de las sales sobre la misma en los momentos de paro de la ósmosis, se instala un equipo de desplazamiento o *flushing* mediante el cual, una vez se ha dado la orden de paro a la planta, se introduce a la membrana agua ya osmotizada y se desplaza toda el agua contenida en las mismas hacia el punto de rechazo. De

esta manera, la ósmosis queda lista para volver a funcionar cuando se den las condiciones de inicio.

El equipo de desplazamiento toma el agua del depósito de limpiezas y se intercala en la línea de impulsión una filtración de seguridad. El control de la bomba se realiza por tiempo y/o nivel.

El proceso de ósmosis se complementa con una serie de equipos de medida de calidad de agua y caudal de tratamiento para afianzar el funcionamiento y comprobar los puntos de trabajo.

#### Desplazamiento por gravedad

En previsión de un fallo de corriente, se dota al sistema de ósmosis con un equipo de desplazamiento por gravedad. Éste está compuesto por un depósito y una válvula con actuador neumático de simple efecto para la descarga del mismo en el momento en que se detecte la falta de tensión.

#### Tratamiento por EDI

##### Depósito y bombeo

El agua procedente de la ósmosis se acumula en el depósito de agua osmotizada. Éste es de una capacidad de 5  $\text{m}^3$ . De él aspira un grupo de bombeo diseñado según las características antes mencionadas, que envía el agua hasta los módulos de EDI. Previamente se instala un sistema de filtración de seguridad.

### Microfiltración de seguridad

El agua osmotizada, antes de ser enviada a los módulos de EDI, se filtra sobre cartuchos bobinados de polipropileno con una capacidad de retención de 1 mm. Con esto se consigue un afino del agua a tratar, evitando la llegada de cualquier tipo de partícula sólida de tamaño superior a 1  $\mu\text{m}$  a las membranas de la EDI.

Para ello, se instala un contenedor en acero inoxidable donde se alojan siete unidades de cartuchos de 40" y 1  $\mu\text{m}$ .

### Electrodesionización

Es una nueva tecnología que combina la electrodiálisis y el intercambio iónico. Mediante esta técnica, las sales disueltas pueden ser eliminadas con un bajo consumo energético y sin la necesidad de emplear reactivos regenerantes; el resultado es un agua de elevada calidad que puede ser producida en continuo y con elevados caudales.

La EDI emplea una combinación de membranas selectivas de iones y resinas de intercambio, montadas de forma alternante catiónicas y aniónicas y que empaquetan en su interior la resina de intercambio iónico; todo el conjunto se sitúa entre dos electrodos [ánodo (+) y cátodo (-)] sometidos a una diferencia de potencial eléctrico de corriente continua, la cual fuerza la migración en continuo de los iones desde la cámara de alimentación hasta las cámaras adyacentes de concentrado. Este potencial también rompe las moléculas de agua produciendo iones hidrógeno e hidroxilos que continuamente producen la regeneración de la resina y que evita el uso de reactivos. El proceso de EDI reemplaza a los convencionales lechos mixtos (MB) de resinas, produciendo agua de calidad, no necesitando paradas para la regeneración ni sustitución de resinas.

Los grupos de membrana se disponen sobre un *rack* con sus tuberías de entrada y salida. Estas unidades, todas iguales, se denominan celdas de electrodesioniza-

ción. En función del caudal y características químicas del agua de aporte será la cantidad de módulos EDI que se instalen sobre un bastidor y que formen la planta de desionización.

La instalación de desionización instalada por *Sitra-Prodesa* posee dos módulos EDI, para un caudal unitario de 4  $\text{m}^3/\text{h}$  de producción. A la salida de la EDI se ha instalado un conductímetro especial para aguas ultrapuras.

Se dota al sistema con dos válvulas automáticas de manera que si se detecta un aumento de la resistividad de salida se desvíe el agua hacia la entrada del proceso.

La producción de esta etapa de desionización es de 8  $\text{m}^3/\text{h}$ . Se adopta como conversión de diseño el 90%.

Las aguas tratadas por la EDI pasan al depósito de agua desmineralizada de 50  $\text{m}^3$  de capacidad desde donde el agua se conduce al proceso de cogeneración. El control de nivel de este depósito se realiza mediante un sensor de presión instalado en la base del mismo. Este depósito está dotado de elementos para evitar la absorción de dióxido de carbono del aire y que se contamine así el agua final.

En la *figura 3* se muestra la unidad de electrodesionización.

### Efluentes

Los diferentes rechazos que no son recirculados dentro de la planta se envían al depósito de efluentes. Éste se diseña para que su volumen útil sea capaz de recibir un lavado entero de los filtros primarios más una hora de funcionamiento del rechazo de la ósmosis. Por tanto, el volumen útil del depósito de efluentes es de 15  $\text{m}^3$  de capacidad total.

Del depósito de efluentes aspira un grupo de bombeo diseñado como todos los anteriores, capaz de vaciar el depósito en 1 h. Estas bombas trabajan, en este caso, a caudal constante mediante la señal analógica proporcionada por el caudalímetro que hace lazo con un variador de frecuencia instalado en el CCM.

### Cuadro de control

El cuadro de control está equipado con un autómata programable (PLC). Dicho PLC es el que gobierna la totalidad de las funciones de la planta, por lo tanto, es la parte más delicada del sistema.

Para visualizar el funcionamiento global de la planta existe una pantalla de visualización y de programación la cual nos permite acceder a los parámetros del autómata.



Figura 3. Vista parcial de la unidad de electrodesionización.

## Análisis de funcionamiento de la instalación

La instalación de desmineralización del proyecto *Cogeneración IV* de *BP Oil Refinería de Castellón* desarrollada por *Sitra-Prodesa* fue puesta en servicio en julio de 2009.

Toda la analítica de control de la instalación se efectúa en *Iproma, S.L.*, laboratorio acreditado por ENAC.

La *figura 4* muestra la evolución de caudales de la instalación de OI, tanto para el paso uno como para el paso dos, mientras que la *figura 5* muestra la evolución de la producción de

la unidad de desmineralización por EDI.

Como puede observarse en las figuras, la producción se ha mantenido constante a lo largo de estos tres primeros años de funcionamiento, sobre todo, en lo que a la EDI se refiere. Por lo que respecta a la OI, inicialmente se observa el alza en caudal hasta conseguir el ajuste final de diseño y, posteriormente, hace unos meses, un descenso de producción en el segundo paso, propiciado por ensuciamiento de las membranas debido a factores externos, que se solucionó con limpiezas químicas y reposición parcial de membranas.

Por lo que a la calidad del agua producida se refiere, ésta se muestra en las figuras siguientes para las distintas etapas del proceso. La *figura 6* muestra la evolución de la calidad del producto en el tiempo para la instalación por OI en sus dos pasos. Como se puede observar, la variación en la calidad del permeado del primer paso tiene escasa o nula influencia sobre la calidad del permeado del segundo paso. En la *figura 7* se muestra la calidad del diluido de la unidad de EDI obtenido y su constancia. Se aprecia una ligera disminución al cabo de unos dos años de servicio debido a que la calidad obtenida era excesiva, pudiendo ser rebajada.

## Conclusiones

La combinación de procesos propuesta, desarrollada, implementada y asistida técnicamente durante su explotación por *Sitra-Prodesa* para la producción de agua desmineralizada del proyecto de la *Cogeneración IV* que *BP Oil* realizó en su refinería de Castellón presenta una elevada eficacia y robustez.

Gracias al *feedback* entre los departamentos de ingeniería y explotación ya incorporó durante la fase de diseño criterios para facilitar el mantenimiento de la planta. Esto ha repercutido en un mayor control de los factores de ensuciamiento y mediante la asistencia técnica prestada se ha conseguido

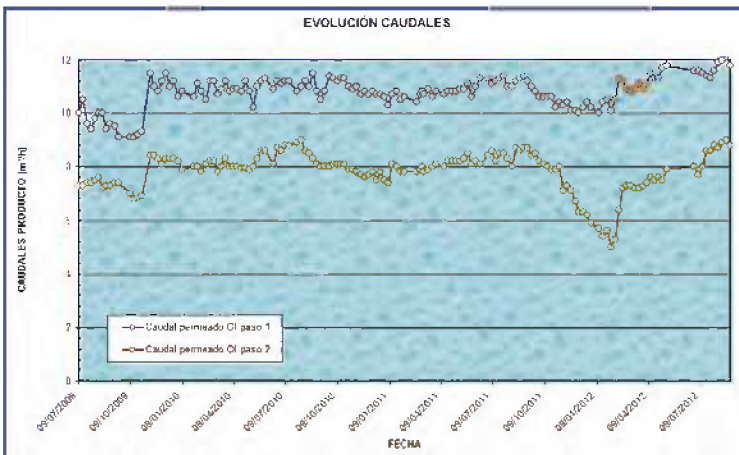


Figura 4. Caudal de producción de las unidades de OI.

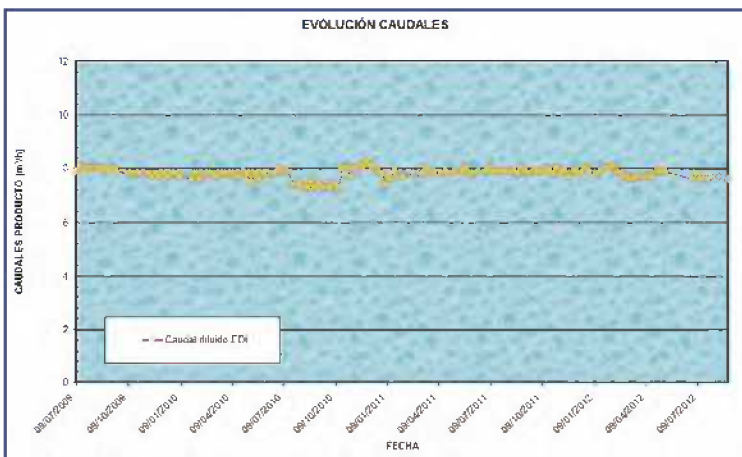


Figura 5. Caudal de producción de la unidad de EDI.

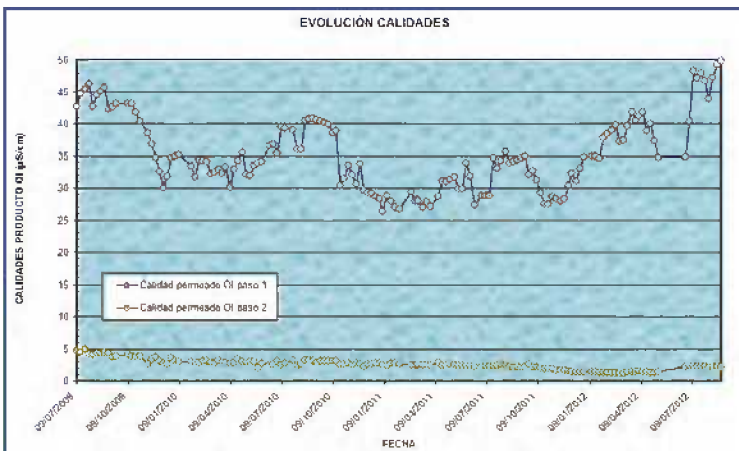


Figura 6. Calidad de Permeado de las unidades de Ósmosis Inversa.

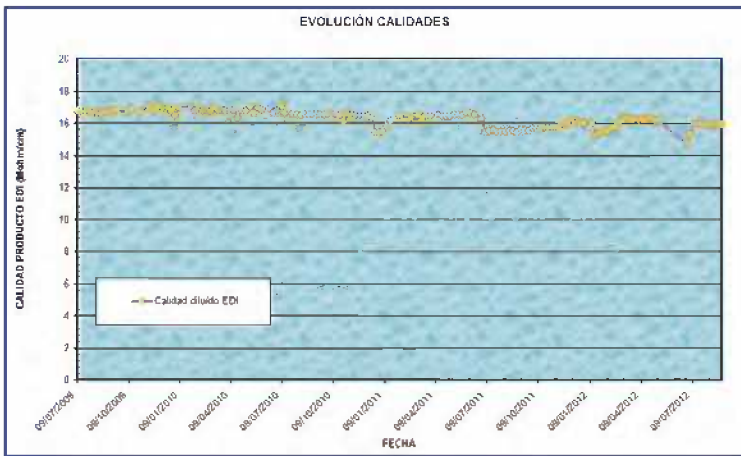


Figura 7. Calidad de producción de la unidad de EDI.

un ahorro notable en los costes de explotación, más concretamente en el consumo de fungibles (membranas, filtros, etc.) y todos los costes indirectos asociados (producto químico, mano de obra, etc.). En concreto, se ha conseguido reducir, considerablemente, la tasa de reposición de membranas y módulos de electrodesionización (uno de los costes más importantes de una planta), incluso debido a la elevada calidad del producto de las líneas de ósmosis, se ha conseguido reducir al mínimo las

limpiezas químicas de la línea de EDI.

La adecuación de la calidad del agua a tratar para cada proceso y la configuración en línea han permitido potenciar el efecto sinérgico de los mismos. Los elevados rendimientos del sistema han permitido garantizar la producción y la calidad de forma continua durante todo el periodo de funcionamiento de la misma.

Paralelamente, esta aplicación ha permitido obtener un aumento adicional de la producción energética de la turbina.

## Bibliografía

- American Society of Civil Engineers and American Water Works Association. 1990. *Water Treatment Plant Design, 2<sup>nd</sup> Edition*. McGraw-Hill Publishing Company.
- APHA, AWWA, WPCE. 1992. *Métodos Normalizados para Análisis de Aguas Potables y Residuales*. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Betz Laboratories, Inc. 1980. *Handbook of Industrial Water Conditioning*. Betz.
- Degremont. 2007. *Water Treatment Handbook, 7<sup>th</sup> Edition*. Lavoisier Publishing.
- Fariñas Iglesias, M. 1999. *Ósmosis Inversa. Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones*. McGraw-Hill, Ente Vasco de la Energía e Iberdrola.
- Perry, R. y Green, D. (eds.). 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7<sup>th</sup> Edition*. McGraw-Hill.
- Thermal Engineering Ltda. Disponible en: [http://www.thermal-cl/prontus\\_thermal/site/edic/ba se/port/inicio.html](http://www.thermal-cl/prontus_thermal/site/edic/ba se/port/inicio.html).

