



# Retornos de experiencias en ETAP con ósmosis inversa: El Prat de Llobregat (2009-2012)

**Juan Manuel Ortega Díaz** dirección técnica de Veolia Water Solutions & Technologies

**Idoia García Velasco** ingeniera de Proceso de Veolia Water Solutions & Technologies

**Joan Sanz Ataz** dirección técnica de Veolia Water Solutions & Technologies

**Aureliano García Ruz** dirección técnica de Aigües del Prat

**Carlos Miguel Centeno** jefe de planta desalinizadora de Aigües Ter Llobregat (ATLL)

Desde enero de 2009 Aigües del Prat produce sin interrupción más del 90% del agua de consumo humano del municipio de El Prat con el proceso de ósmosis inversa. Este artículo presenta la experiencia adquirida en el periodo 2009-2012 en los siguientes aspectos: operación y mantenimiento y sus costes asociados, fiabilidad, control de calidad del agua distribuida, evolución de la calidad de las aguas subterráneas y su gestión, cambios de la calidad del agua en la red, experiencia en planta de demostración para la remineralización del permeado, percepción pública, retornos de experiencia y, por tanto, las lecciones aprendidas.

#### **Palabras clave**

Acuífero profundo, salinización, ósmosis inversa, costes de operación, lecciones aprendidas, retorno de experiencia.

#### **Returns of experience with reverse osmosis: DWTP El Prat de Llobregat (2009-2012)**

*Since January 2009 Aigües del Prat continuously produces more than 90% of drinking water in the municipality of El Prat (Barcelona, Spain) with the reverse osmosis process. This article presents the experience gained in the period 2009-2012 in the following areas: operation and maintenance and the associated costs, reliability, water quality control distributed evolution of groundwater quality and its management, quality changes water on the water network, demonstration plant experience for permeate remineralization, public perception, returns of experience and, therefore, lessons learned.*

#### **Keywords**

*Deep aquifer, salinization, reverse osmosis, operating costs, lessons learned, experience return.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Existe un amplio conocimiento del origen, de las características principales y de la evolución histórica del acuífero del Delta del Llobregat, que constituye la principal fuente de abastecimiento de agua potable del municipio barcelonés de El Prat de Llobregat (64.000 habitantes). Igualmente, y debido a la salinización del acuífero, posterior a la contaminación por compuestos orgánicos volátiles, han sido difundidas ampliamente las razones para la instalación de dos ETAP con tecnología de membranas, y más concretamente de ósmosis inversa: la ETAP de Sagnier y la ETAP Mas Blau.

La gestión de la construcción de estas plantas de tratamiento fue realizada por ATLL (Valero *et al.*, 2010), la construcción, montaje y puesta en marcha fue realizada por VWSI en el año 2009, y la operación, mantenimiento y explotación viene siendo realizada por la empresa pública Aigües del Prat desde 2009 hasta la fecha.

La evolución del acuífero, el cuidado en la explotación de los pozos abastecedores que tienen su procedencia en el mencionado acuífero, el seguimiento y control de las operaciones de mantenimiento y operación (OPEX) y el control analítico continuo en diferentes puntos de la red de suministro, han permitido suministrar agua de excelente calidad y dentro de los parámetros que fija el RD 140/2003 a diferentes tipos de industrias y al ciudadano con una aceptación mayoritaria (Sanz *et al.*, 2012). De igual forma, el diseño y características de las plantas de tratamiento han permitido mantener e incluso mejorar el rendimiento de las mismas. A diferencia de otras instalaciones similares, estas plantas funcionan diariamente cubriendo hasta un 90% de la demanda.

La gestión del rechazo hasta la EDAR de El Prat no supone ningún impacto ambiental ni de funcionamiento en las instalaciones receptoras. En cualquier caso, está construida una red de vertido del agua de rechazo al colector de salmuera en construcción.

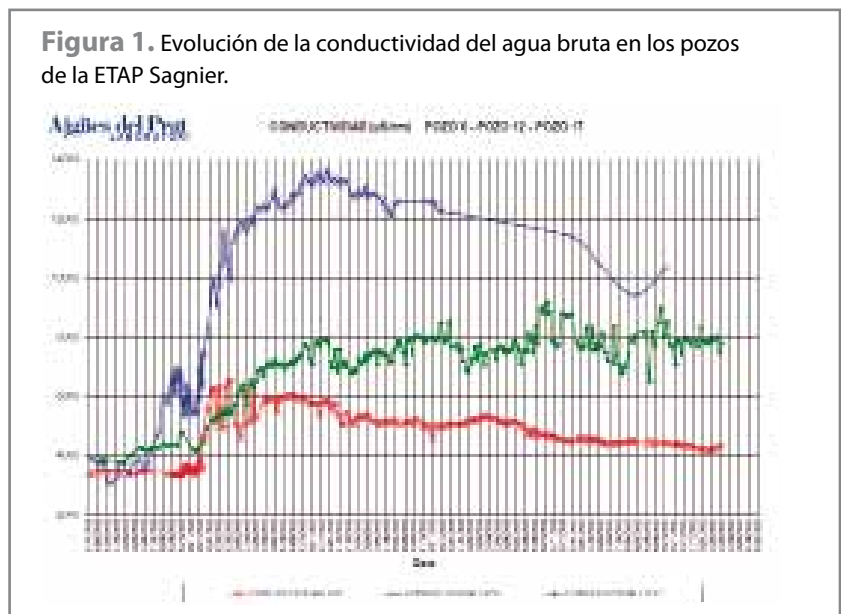
Fruto de la amplia experiencia obtenida en más de cuatro años de funcionamiento, se han extraído un conjunto de lecciones aprendidas que, en algunos casos, se han implementado a lo largo del tiempo y, en

otros, sirven o servirán como mejora en posibles remodelaciones a través de la aplicación de los retornos de experiencia obtenidos (REX), y que son objeto de este artículo.

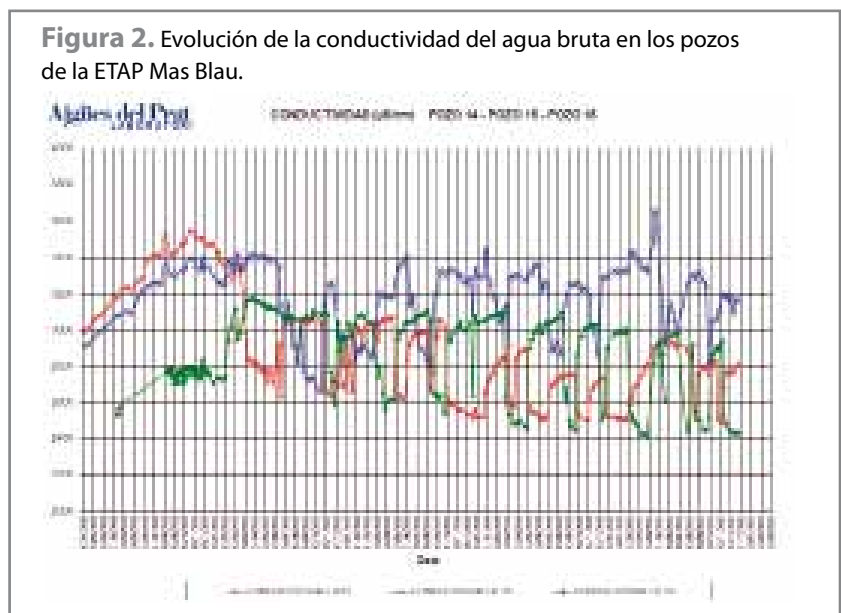
## 2. CALIDAD DEL AGUA BRUTA

La conductividad del agua bruta es medida y registrada como control del fenómeno de intrusión de agua de mar, ya que podría cambiar las condiciones de operación y alejarse de los valores utilizados en el diseño de la ETAP. Cada ETAP utiliza tres

**Figura 1.** Evolución de la conductividad del agua bruta en los pozos de la ETAP Sagnier.



**Figura 2.** Evolución de la conductividad del agua bruta en los pozos de la ETAP Mas Blau.



pozos: dos pozos para alimentar los sistemas de ósmosis inversa y el tercero en alternancia.

La ETAP Sagnier emplea los pozos número 8, 12 y 17. El pozo 12 aumentó su conductividad por encima de 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y se cerró durante el primer año de operación de la planta. Los pozos 8 y 17 presentan diferentes tendencias frente a la evolución de la conductividad. Después de la puesta en marcha de planta, la conductividad de agua bruta promedio aumentó en Sagnier (Figura 1).

La ETAP Mas Blau emplea los pozos número 14, 15 y 16, dos ellos en servicio y el tercero en alternancia. La conductividad del agua bruta fue menor que en Sagnier debido a que la intrusión de agua de mar fue menos importante, aunque por el con-

trario la concentración de compuestos orgánicos volátiles fue superior al valor paramétrico. Después de la puesta en servicio de la ETAP, la conductividad del agua bruta aumentó, pero rápidamente se estabilizó. Se ha observado que al operar esta planta sin interrupción (24 horas/día), los registros de conductividad de los pozos presentaron variaciones entre el estado de reserva y producción (Figura 2).

### 3. FIABILIDAD DE LAS ETAP

Después de la puesta en marcha, Aigües del Prat operó ambas ETAP como fuente principal de abastecimiento. Por tanto, a partir de enero de 2009 (ETAP Sagnier) y febrero de 2009 (ETAP Mas Blau) la seguridad del suministro de agua a la red que-

dó en manos de la fiabilidad del proceso de ósmosis inversa. Durante el año 2009 hubo algunos problemas con los sistemas de distribución debido a roturas en conducciones que obligaron a parar temporalmente la producción de las ETAP durante la reposición de tuberías y comprar más agua al recurso externo (ATLL). Tras las mejoras realizadas en la red durante este primer año se pudo alcanzar la capacidad máxima de producción de las ETAP de acuerdo con la demanda. El periodo 2010-2012 presentó una buena estabilidad en la producción del agua por las ETAP. La Figura 3 muestra la evolución de la producción de agua por las ETAP y de los recursos externos (ATLL).

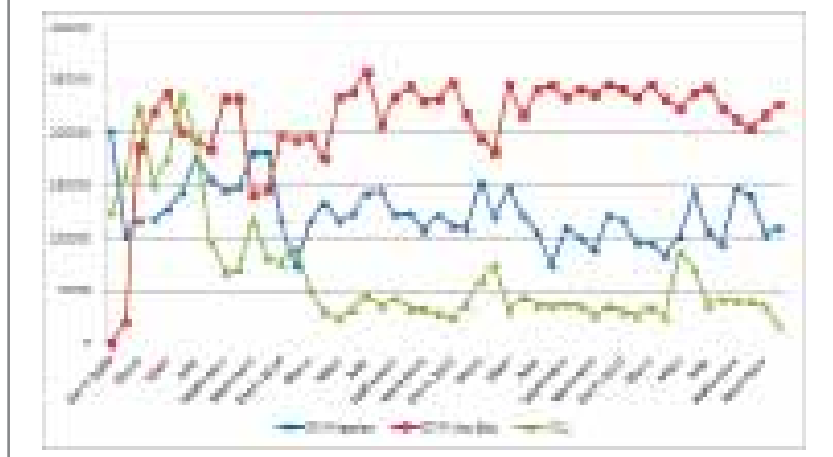
Además de las incidencias en la red ya citadas, se detectaron otras pérdidas no relacionadas con roturas que implicaron también mayor producción hasta su corrección. Así la producción media anual fue aproximadamente 26% más que los siguientes tres años (Tabla 1). Después de 2009, el agua suministrada desde las instalaciones de desalinización rondó el 90% del consumo total del municipio. Razones económicas y técnicas (contrato ATLL de coste fijo y la conducción a un polígono industrial con tubería de diferente presión) obligan a mantener el recurso externo (ATLL) cerca del 5% como mínimo. En estas condiciones, prácticamente todo el agua suministrada al municipio es procedente de las dos ETAP.

Sobre el mantenimiento de las ósmosis inversas, después de la puesta en marcha, se ha realizado solamente una limpieza preventiva al año. Durante la puesta en marcha se produjo una incidencia por falta de dosis de inhibidor de incrustación en la ETAP Sagnier. Esta incidencia produjo la incrustación por sulfato de calcio en la segunda etapa de ambas líneas. Para recuperar las prestaciones

**Tabla 1.** Distribución de las fuentes disponibles de agua para suministro a la red. Periodo 2009-2012.

Origen	2009	2010	2011	2012
ATLL (%)	29,2	11,4	10,6	10,8
ETAP Sagnier (%)	30,9	31,3	29,7	29,3
ETAP Mas Blau (%)	37,3	57,3	59,7	59,9
Sagnier y Mas Blau (%)	68,2	88,6	89,4	89,2
Pozos (%) solo año 2009	2,7	0	0	0
Promedio anual ( $\text{m}^3/\text{día}$ )	15.937	12.595	12.572	12.495

**Figura 3.** Volumen mensual de agua producida ( $\text{m}^3/\text{mes}$ ) por la ETAP Sagnier, la ETAP Mas Blau y suministro en alta (ATLL) en el periodo 2009-2012.





se empleó el protocolo de Dow para limpieza específicas (EDTA, hidróxido de sodio y cloruro de sodio, pH 12, 30 °C). En cuanto al recuperador de energía Turbo Charger, no se han observado incidencias ni ha requerido un mantenimiento especial.

El personal de operación ha supervisado el rendimiento mediante la normalización de datos de operación de las ósmosis inversas aplicando el software FTNorm de Dow. Después de cuatro años, el caudal normalizado de producción, el paso de sales y la presión diferencial han seguido la evolución esperada en el diseño. Estos resultados son consecuencia de la buena calidad de las aguas del acuífero principal del Llobregat, de la correcta gestión en la explotación del mismo y de la atención prestada a la operación y mantenimiento de los sistemas de ósmosis inversa.

#### 4. ASPECTOS ECONÓMICOS

El proyecto de desalinización de agua de El Prat de Llobregat requirió una inversión de 6,3 millones de euros. La Unión Europea contribuyó con un 80% mediante fondos de cohesión. El 20% restante fue proporcionado por ATLL. Durante el primer año de operación (2009), se mejoró la red de agua con el fin de disminuir las pérdidas de agua, cambiar las tuberías obsoletas y reducir la sobreproducción consecuencia de las fugas. La eficiencia de la red aumentó del 67% en 2009 al 82% en 2010 y al 79% en 2011. Debido a todo ello, el análisis económico no se ha considerado representativo para este primer año de funcionamiento.

Después de la implementación de las mejoras de la red se han calculado correctamente los costes de operación y mantenimiento durante los años 2010, 2011 y 2012. Estos costes totales (que incluyen bombas de pozos, plantas de ósmosis inversa

y estación de bombeo a la red) durante esos años se muestran en las **Tablas 2, 3 y 4**. En los cuatro años el coste total fue de alrededor de 0,40 €/m<sup>3</sup>. El consumo de energía específica se registró desde el año 2009 y ha evolucionado con la salinidad de

los pozos y la edad de las membranas (**Tabla 5**).

#### 5. CALIDAD DEL AGUA EN LA RED

En la práctica, el objetivo de calidad de agua se obtiene fijando la con-

**Tabla 2.** Costes de operación y mantenimiento durante 2010.

Concepto	ETAP Sagnier coste €/m <sup>3</sup>	ETAP Mas Blau coste €/m <sup>3</sup>	Ambas ETAP coste €/m <sup>3</sup>
Energía	0,172	0,121	0,139
Reactivos y reposiciones	0,055	0,041	0,046
Mano de obra	0,052	0,028	0,037
Control de calidad	0,065	0,065	0,065
Depreciación	0,139	0,076	0,098
Otros	0,011	0,011	0,011
Coste total	0,494	0,342	0,396

**Tabla 3.** Costes de operación y mantenimiento durante 2011.

Concepto	ETAP Sagnier coste €/m <sup>3</sup>	ETAP Mas Blau coste €/m <sup>3</sup>	Ambas ETAP coste €/m <sup>3</sup>
Energía	0,154	0,118	0,13
Reactivos y reposiciones	0,081	0,05	0,06
Mano de obra	0,055	0,027	0,037
Control de calidad	0,065	0,065	0,065
Depreciación	0,147	0,073	0,097
Otros	0,011	0,011	0,011
Coste total	0,513	0,345	0,401

**Tabla 4.** Costes de operación y mantenimiento durante 2012.

Concepto	ETAP Sagnier coste €/m <sup>3</sup>	ETAP Mas Blau coste €/m <sup>3</sup>	Ambas ETAP coste €/m <sup>3</sup>
Energía	0,152	0,114	0,126
Reactivos y reposiciones	0,057	0,044	0,048
Mano de obra	0,056	0,027	0,037
Control de calidad	0,066	0,066	0,066
Depreciación	0,15	0,073	0,098
Otros	0,011	0,011	0,011
Coste total	0,491	0,335	0,386

ductividad en un punto de consigna cercano a 1.100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mezclando agua filtrada con permeado y empleando un lazo de control PID sobre la conductividad de la mezcla y la válvula de *by-pass*. Como parámetros indicadores de la calidad química del agua se tomaron tres: trihalometanos (THM), compuestos orgánicos volátiles (TCE + PCE) y carbono orgánico total (TOC). Las **Tablas 6 y 7** muestran los resultados mensuales de análisis para estos parámetros. Los valores bajos de THM

son consecuencia de la reducción del carbono orgánico total y bromuro en el proceso de ósmosis inversa.

El control de calidad de agua del laboratorio de Aigües del Prat incluye todos los parámetros según RD 140/2003, con frecuencia semanal y mensual, incluyendo pozos, sistemas de ósmosis inversa, mezclas, red y puntos de uso.

## 6. REMINERALIZACIÓN

Con el fin de cumplir con uno de los requisitos marcados en el RD

140/2003 en lo que se refiere al carácter agresivo o incrustante del agua, el índice de saturación de Langelier deberá de estar comprendido entre  $\pm 0,5$ . Las ETAP poseen un proceso de mezcla controlada en valores de dureza, alcalinidad, conductividad y pH que permiten cumplir con el valor mencionado. Precisamente, y como uno de los objetivos marcados de mejora, se planteó la posibilidad de realizar un proyecto de demostración de remineralización con lecho de caliza en flujo ascendente (Hernández, 2010) que permitiría en un futuro mejorar la calidad del agua suministrada disminuyendo la conductividad resultante de las salidas de las ETAP y la mezcla correspondiente.

A tal fin se dispuso de una columna de remineralización cedida por ATLL (**Figura 4**) y se diseñó una planta de demostración con el equipamiento, instrumentación y registro. Los análisis realizados por el Laboratorio de Aigües del Prat permitieron obtener un completo seguimiento del funcionamiento y de los resultados obtenidos. El objetivo de la planta de demostración fue la definición de los parámetros de operación del proceso de remineralización con especial atención a la mínima variación de la turbidez del agua remineralizada y a la obtención del índice de saturación de Langelier cercano al equilibrio.

La **Figura 5** muestra la distribución de probabilidad para el índice de saturación de Langelier en una de las series de operación sin adición de anhídrido carbónico, mientras que la **Figura 6** muestra la serie temporal de valores de turbidez registrados a la salida de la columna de remineralización y en la mezcla con agua filtrada y permeado.

## 7. LECCIONES APRENDIDAS. RETORNOS DE EXPERIENCIA

El cuidado y el seguimiento en la

**Tabla 5.** Consumo específico de energía en el periodo 2009-2012.

Año	ETAP Sagnier kWh/m <sup>3</sup>	ETAP Mas Blau kWh/m <sup>3</sup>	Ambas ETAP kWh/m <sup>3</sup>
2009	1,242	0,842	1,043
2010	1,191	0,912	1,011
2011	1,219	0,912	1,017
2012	1,272	0,968	1,068

**Tabla 6.** Indicadores de calidad de agua después de la ETAP Sagnier (muestras de la red).

ETAP Sagnier	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	THM ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	TCE+PCE ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	TOC ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )
Número de análisis	20	36	61	58
Mínimo	1.041	1,3	0,4	0,2
Máximo	1.203	19	2,3	0,6
Percentil 50	1.079	4,1	1,2	0,2
Percentil 95	1.155	19	2	0,34

**Tabla 7.** Indicadores de calidad de agua después de la ETAP Mas Blau (muestras de la red).

ETAP Mas Blau	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	THM ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	TCE+PCE ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	TOC ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )
Número de análisis	20	35	52	57
Mínimo	1.025	1,3	1,5	0,2
Máximo	1.204	19	8,5	1
Percentil 50	1.065	6,6	3,5	0,3
Percentil 95	1.181	19	6,8	0,54



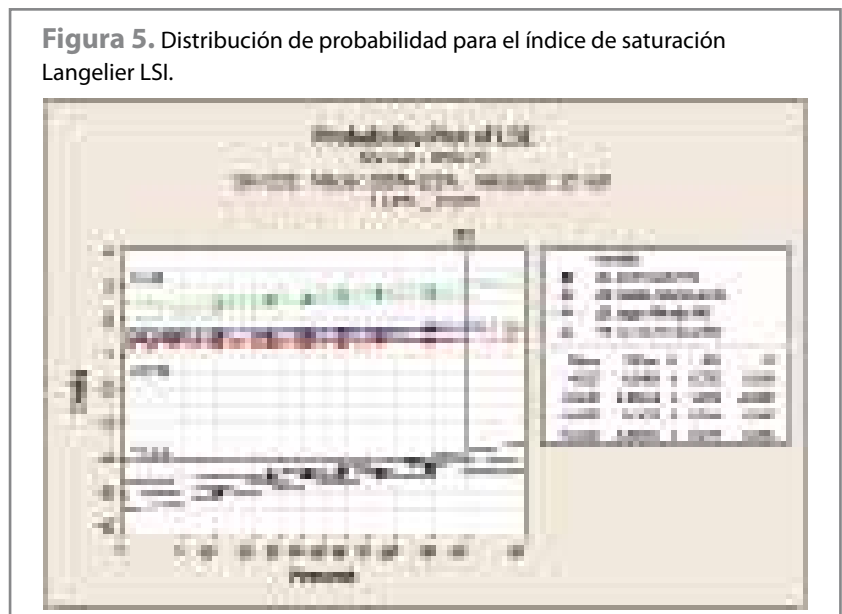
explotación de los acuíferos es una de las claves para una buena gestión posterior de las plantas de ósmosis inversa. Es, por tanto, esencial el control, la verificación y el seguimiento de los pozos para la adopción de medidas eficaces en la operación y en el buen funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa.

Un buen control sobre la dosificación del producto inhibidor de incrustación antes de las membranas y la prevención ante cualquier error en la dosificación del producto o la elección del mismo, asegura la vida útil de las membranas. Este hecho se refleja en la mejora de las operaciones de recuperación de las prestaciones de las membranas o en la tasa de reposición de membranas, ahorrando costos de explotación.

El equilibrio de flujos sobre las membranas, por medio del Turbo Charger instalado entre etapas en la ósmosis inversa, permite, además de una excelente distribución hidráulica entre membranas con equilibrio entre tasa de conversión y producción en los tubos, reducir el consumo de energía que se corresponde al tipo de membranas actualmente instaladas. Este tipo de recuperador de energía no ha presentado ninguna incidencia durante los cuatro años de operación.

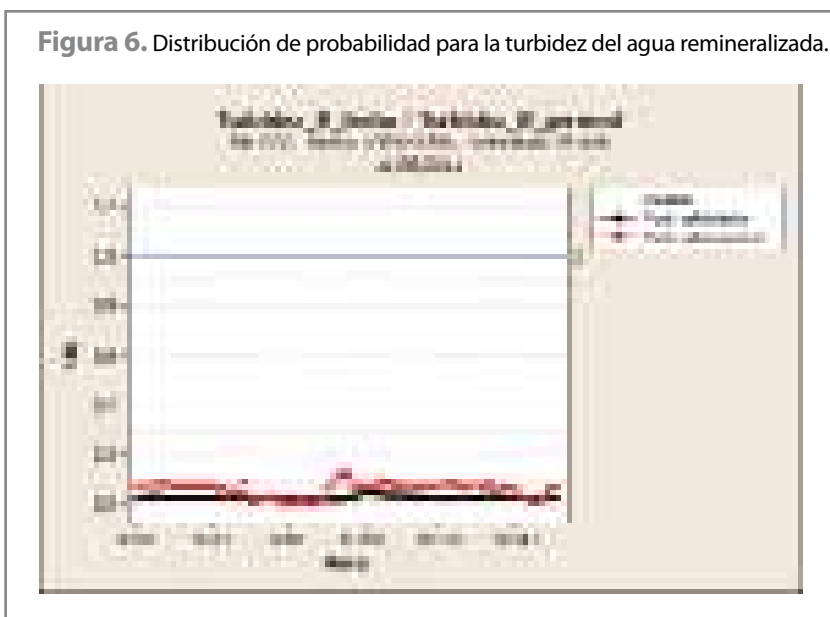
El mantenimiento estable de la presión en la red de distribución por medio de variadores de frecuencia resulta una herramienta eficaz, no solo para evitar oscilaciones de presión en tuberías, sino también para conseguir un ahorro energético en el consumo final.

Si bien la mezcla de agua osmotizada y agua filtrada en la ETAP, junto a la incrustación residual existente en la red, actúan como sistema de remineralización en línea, con la instalación de una planta remineralizadora por medio de lecho de calcita,



se obtiene una superior calidad de agua comparado con el sistema actual de mezcla, tanto bajo el punto de vista de conductividad como de los parámetros que influyen en el

buen control del índice de saturación de Langelier, no siendo necesaria la inyección de  $\text{CO}_2$  dadas las características del agua de alimentación a las dos ETAP.

**Figura 6.** Distribución de probabilidad para la turbidez del agua remineralizada.

Es posible optimizar y mejorar el consumo de energía aplicando los nuevos desarrollos existentes de membranas. La posibilidad de utilizar 'membranas inteligentes', además de asegurar la utilización de la tecnología de la ósmosis inversa, permitirá mejorar, prevenir y optimizar la operación de una planta de características similares a la expuesta en este documento.

Durante los cuatro años de producción de agua potable, las reclamaciones de la población sobre las características estéticas del agua potable o problemas con los electrodomésticos desaparecieron.

## 8. CONCLUSIONES

Aigües del Prat produce desde 2009 agua de consumo humano partiendo del acuífero principal del Llobregat mediante dos ETAP de ósmosis inversa. Después de cuatro años de operación y mantenimiento, Aigües del Prat presenta en este trabajo la experiencia en operación y mantenimiento, rendimiento y fiabilidad, calidad del agua potable obtenida y opinión pública.

Después de cuatro años de operación de ambas instalaciones, el

suministro ha sido de cerca del 90% del agua potable del municipio sin interrupción. Los sistemas de ósmosis inversa necesitan únicamente una limpieza preventiva al año siguiendo las recomendaciones del fabricante. El dispositivo de recuperación de energía (Turbo Charger) no ha presentado ninguna incidencia ni ha precisado intervenciones especiales.

El coste total de operación y mantenimiento en el año 2012 es en promedio de 0,40 €/m<sup>3</sup>. El coste de la ETAP Sagnier, con mayor conductividad de agua bruta que la ETAP Mas Blau, es de 0,491€/m<sup>3</sup> y en la ETAP Mas Blau el coste es 0,335 €/m<sup>3</sup>. El consumo de energía específica para la ETAP Sagnier y la ETAP Mas Blau es 1,27 kWh/m<sup>3</sup> y 0,97 kWh/m<sup>3</sup> respectivamente. El coste total y el consumo específico de energía incluyen todos los equipos desde el acuífero hasta el sistema de distribución de agua potable.

El proceso de ósmosis inversa, incluida la mezcla con agua filtrada, alcanza la calidad del agua potable según la normativa española. Los valores de los tres parámetros indicadores seleccionados (THM, compuestos orgánicos volátiles -TCE +

PCE- y TOC), después de mezclar con agua filtrada, presentan los siguientes percentiles 95:

- THM = 19 µg/l (ambos servicios).
- TCE + PCE = 2,0 µg/l (ETAP Sagnier) y 6,8 µg/l (ETAP Mas Blau).
- TOC = 0,34 µg/l (ETAP Sagnier) y 0,54 µg/l (ETAP Mas Blau).

## 9. AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen a los técnicos y operarios de Aigües del Prat por la calidad de su trabajo y su dedicación, a los técnicos del Laboratorio de Aigües del Prat por aclaraciones sobre la calidad del agua distribuida y al servicio técnico de VWSI por la coordinación y apoyo a los diferentes equipos de Aigües del Prat en los trabajos de operación y mantenimiento. También agradecen a la Comunitat d'Usuaris d'Aigües del Delta del Llobregat y en especial a Enric Queralt por sus observaciones sobre la evolución de la calidad del agua del acuífero en el municipio del Prat de Llobregat. A ATLL por la cesión a Aigües del Prat de la columna de remineralización para poder desarrollar el proyecto de demostración en la ETAP Sagnier. Finalmente, los autores agradecen los consejos y recomendaciones de Manuel Hernández en todo lo relativo a la remineralización empleando lechos de calcita.

### Bibliografía

- [1] Hernández Suárez, M. (2010). 'Guía para la remineralización de las aguas desaladas'. Disponible en (consultado en abril 2013): [http://www.fcca.es/static\\_media/file\\_uploads/Guia\\_para\\_la\\_remineralizacion\\_de\\_aguas\\_desaladas\\_rev3.pdf](http://www.fcca.es/static_media/file_uploads/Guia_para_la_remineralizacion_de_aguas_desaladas_rev3.pdf).
- [2] Sanz, J.; García, A.; Miró, J.; Miguel, C. (2012). 'Drinking water supply by reverse osmosis plants: three years of experience at El Prat de Llobregat Municipality'. Desalination and Water Treatment. DOI:10.1080/19443994.2012.704728.
- [3] Valero, F.; Miguel, C.; Sanz, J.; García, A. (2010). 'Mejora de la calidad del agua suministrada al Prat de Llobregat mediante el uso de ósmosis inversa en aguas subterráneas'. XXX Jornadas Técnicas de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento, pág. 59-69.