

Instalaciones para el tratamiento avanzado de agua regenerada de la barrera hidráulica contra la intrusión salina en el acuífero del Delta del Llobregat

La sobreexplotación a la que se ha visto sometido el Delta del Llobregat durante décadas ha provocado que esté afectado por procesos de intrusión marina. Con el objetivo de frenar su avance, la Agencia Catalana del Agua está desarrollando un proyecto basado en la construcción de una barrera hidráulica positiva mediante la inyección, a través de 14 pozos, de agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat previamente tratada mediante procesos de ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección. Se trata del primer proyecto de estas características que se lleva a cabo en España, y es también pionero a nivel europeo.

José Luís Pitarch Navarro, Agua, Residuos y Medio Ambiente S.A. (AREMA);
Joan Joves Paniello, Felip Ortuño Govern y Guillem Peñuelas Prieto, Agència Catalana de l'Aigua (ACA)

Introducción

El acuífero principal del Delta del Llobregat está afectado por procesos de intrusión marina desde 1970, producto principalmente de su sobreexplotación desde mediados del siglo pasado ya que está considerado un recurso esencial tanto para el abastecimiento de boca a la ciudad de Barcelona como para el desarrollo industrial de la zona. Para detener el avance del agua marina en el acuífero, la Agencia Catalana del Agua está llevando a cabo, entre otras acciones de recarga artificial en el acuífero, la construcción de una barrera hidráulica positiva mediante la inyección de agua regenerada tratada en 14 pozos. Este proyecto es el primero de estas características que se realiza en España y pionero en Europa. La barrera eleva el nivel de agua del acuífero cerca de la costa y evita que el agua salada penetre tierra adentro, utilizando para ello agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat (Barcelona) con tratamientos adicionales de ultrafiltración, ósmosis y desinfección.

La barrera hidráulica se desarrolla en dos fases: una primera fase o fase piloto ejecutada por la sociedad Depurbaix S.A., participada en un 85% por el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, y en un 15% por la Agencia Catalana del Agua, y transferida en el 2008, y una segunda realizada íntegramente por la Agencia. La fase piloto está en marcha desde el mes de marzo de 2007 inyectando agua regenerada en el acuífero, y mantiene actualmente un caudal de inyección de 2.500 m³/día en tres pozos. El agua de

inyección es sometida, después de los tratamientos secundario y terciario, a ultrafiltración, ósmosis (al 50%) y desinfección con UV. La primera fase lleva ya más de 2 años de funcionamiento con resultados altamente positivos, ya que se ha observado una mejora substancial de la calidad del agua subterránea

en los pozos cercanos a los puntos de inyección y no han aparecido fenómenos de colmatación en los pozos, los cuales son la principal causa del fracaso de estos proyectos.

La segunda fase está siendo ejecutada íntegramente por la Agencia Catalana

Tabla 1. Caudales a tratar en cada una de las etapas

Caudales unitarios en los diversos procesos	Caudales de tratamiento en la 1ª Fase (marzo 2007)	Caudales de tratamiento en la 2ª Fase (2008-2009)	Caudales de tratamiento totales Fase 1 + Fase 2
Caudal alimentación UF	3.885 m ³ /día	15.740 m ³ /día	19.625 m ³ /día
Caudal rechazo UF	393 m ³ /día	1.574 m ³ /día	1.967 m ³ /día
Caudal alimentación OI	3.350 m ³ /día	6.666 m ³ /día	10.016 m ³ /día
Caudal de rechazo OI	838 m ³ /día	1.666 m ³ /día	2.504 m ³ /día
Caudal OI y desinfección por UV	2.513 m ³ /día	5.000 m ³ /día	7.513 m ³ /día
Caudal de agua UF y desinfectada por UV para la mezcla	–	7.500 m ³ /día	7.500 m ³ /día
Caudal total de agua para inyección al acuífero	2.513 m ³ /día	12.500 m ³ /día	15.013 m ³ /día



Regeneración de aguas de
Depurbaix y barrera
hidráulica contra la intrusión
salina del acuífero del
Llobregat.
Capacidad: 15.000 m³/día



EDAR y red de colectores
de 147 Kms en Piedras Negras
(México)
Capacidad: 42.000 m³/día



Regeneración de aguas
industriales de Fibracolor.
Capacidad 12.000 m³/día.



AREMA
AGUA, RESIDUOS Y MEDIO AMBIENTE



Muntaner 479 3º 1ª · 08021 Barcelona, España
Teléfono: (34) 93 418 47 88 · Fax: (34) 93 417 01 87
www.arema.com · contacto@arema.com

INGENIERÍA · CONSTRUCCIÓN · OPERACIÓN · INVESTIGACIÓN

del Agua y prevé la inyección de un caudal total para la barrera de 15.000 m³/día (5,5 hm³/año) con la construcción adicional de 11 pozos más de inyección y de 16 piezómetros de control específicos en el acuífero. La barrera contará así con una longitud de unos 6 Km y se sitúa paralela a la línea de costa, a unos 1.500 m hacia el interior. Las instalaciones del tratamiento avanzado del agua se ubican físicamente dentro de la EDAR de El Prat. Para la obtención de un caudal final de producción neta de 15.000 m³/día es necesario que las nuevas instalaciones de agua tengan una capacidad de producción de agua osmotizada de 5.000 m³/día y ampliar la capacidad de producción de agua ultrafiltrada hasta los 7.500 m³/día, lo que junto a los 2.500 m³/día de la fase piloto darán el agua suficiente para inyectar en el acuífero.

El agua de inyección para la barrera hidráulica fue al inicio del proyecto un 50% de agua regenerada osmotizada de la EDAR, mezclada con un 50% restante de agua de red, de manera similar a como se realizaba en California en el *Orange County Water District* o en el *West Basin Municipal Water District*. Por motivos económicos y de sostenibilidad ambiental, el agua potable de red fue rápidamente substituida por agua también regenerada, de manera que toda el agua de inyección proviene ahora de la EDAR del Baix Llobregat. Con un caudal de inyección total de 15.000 m³/día ello supondrá un ahorro de 2,7 M€ anuales y una ganancia neta de recurso, ya que el agua de red es aquí agua subterránea que se capta en el mismo acuífero.

Las obras de construcción de la segunda fase fueron adjudicadas ante los excelentes resultados y la recuperación del acuífero de la prueba piloto por medio

Tabla 2. Características del agua del secundario de la EDAR de El Prat

Parámetros	Valor
DBO ₅	<25 mg/l
SST	<35 mg/l
DQO	<125 mg/l
Conductividad	2.500 µS/cm
Coliformes Fecales	10 6 Ufc/100 ml
Turbidez	5,9 UNF
pH	7,56
Fosfatos	1 mg/l
Nitratos	8 mg/l
Sulfatos	262 mg/l
Bicarbonatos	423,7 mg/l
Calcio	162 mg/l
Magnesio	57,9 mg/l
Sodio	375,6 mg/l
Sílice	13,7 mg/l



Figura 1. Vista general de las instalaciones

de una licitación pública en septiembre de 2007 a la empresa Agua, Residuos y Medio Ambiente, S.A. (AREMA).

Datos de partida

La capacidad total de proceso de la instalación es de 19.625 m³/día de agua, siendo los caudales de tratamiento en cada una de las etapas los que se reflejan en la tabla 1.

Las características del agua de alimentación admiten dos posibilidades: directamente procedentes del tratamiento secundario de la Estación Depuradora de Depurbaix, o del tratamiento terciario. La primera posibilidad, cuyas características se reflejan en la tabla 2, se contempla únicamente en casos extremos, y la operación habitual será aquella cuyas aguas sean las procedentes del tratamiento terciario de la depuradora. El agua procedente de este último tiene las características descritas en la tabla 3.

El agua producto para la inyección en el acuífero debe tener las características descritas en la tabla 4, las cuales

Tabla 3. Características del agua del terciario de la EDAR de El Prat

Parámetros	Valor
DBO ₅	10 mg/l
SST	10 mg/l
DQO	50 mg/l
Conductividad	3.500 µS/cm
TOC	10 mg/l
N ₂ Total	<15 mg/l
P Total	<2 mg/l
Coliformes Fecales	10 Ufc/100 ml

vienen definidas tanto por el agua existente en el acuífero como por los requerimientos de la Agencia de Salud Pública para el agua destinada a la recarga directa de acuíferos.

Justificación de la solución adoptada

Las instalaciones de tratamiento de agua de la segunda fase se ubicarán dentro la nave ya construida para la primera fase, situada dentro de las instalaciones de la EDAR del Baix Llobregat, a excepción del depósito de agua ultrafiltrada y el nuevo bombeo de cabecera que estará situado en el exterior de la nave. Básicamente la línea de tratamiento consta de un bombeo inicial de aporte, un sistema de micro-tamizado automático, una ultrafiltración, una ósmosis y una desinfección por UV.

La tecnología empleada en las membranas es una ultrafiltración de membranas sumergida, de fuera hacia den-

Tabla 4. Características del agua tratada para la inyección al acuífero

Parámetros	Límite
Materia en suspensión	10 mg/l
Turbidez	2 NTU
pH	6,5 - 8,5
Conductividad a 20 °	2.000 µS/cm
TOC	10 mg/l
P Total	2 mg/l
N ₂ Total	10 mg/l
Amonio	1 mg/l
Nitratos	10 mg/l
Cloruros	450 mg/l
Nemátodos	1 ou/l
Escherichia	ausencia

tro, es decir, el flujo del agua va desde el exterior de la membrana hacia el interior de la fibra, siendo el resultado que el interior de la membrana siempre está en contacto con agua filtrada y limpia y los sólidos a eliminar, que están fuera de la membrana. Por otro lado, la tecnología empleada para desalinizar el agua es la de la ósmosis inversa, puesto que presenta una mejor calidad de permeado frente a la tecnología de la electrodiálisis reversible ya que la ósmosis es una tecnología ampliamente experimentada con lo que se garantiza un suministro de equipos y recambios. Posteriormente las aguas son desinfectadas por potentes unidades UV, antes de proceder a su distribución en la red de inyección al acuífero.

Las aguas empleadas en los procesos de limpieza de los diferentes procesos de la planta (filtración, ultrafiltración y ósmosis inversa) se conducen hacia el depósito de homogeneización de la EDAR y al emisario submarino, donde se bombean al mar.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En primer lugar, el agua a tratar se almacena en un depósito de hormigón situado a la entrada de planta, el cual es común para la primera y segunda fase, y está preparado mediante un juego de válvulas manuales para que se pueda utilizar agua del tratamiento secundario. El pozo de agua de entrada está equipado con dos grupos de bombes: uno que alimenta la primera fase existente, y uno nuevo que alimenta a la segunda fase.

Las unidades de ultrafiltración, tanto las que actúan como pre-tratamiento necesario para la ósmosis inversa (OI) como las que se mezclan con la anterior para su inyección al acuífero, son tres bastidores de membranas sumergidas de fibra hueca. En cada uno de los tanques se han instalado 3 casets

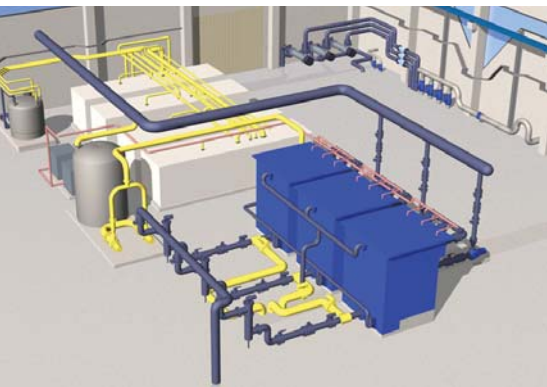


Figura 2. Distribución de las instalaciones

Tabla 5. Parámetros físicos del agua ultrafiltrada		
	Agua bruta	Agua tratada
Temperatura min. de diseño	15 °C	15 °C
Turbidez	n.a	≤ 0,3 NTU
TSS	Media:	10 mg/l
	Máxima:	25 mg/l
DBO ₅	Máximo: < 10 mg/l	n.a.
NH ₄	< 0,2 mg/l	n.a.
SDI	n.a.	< 3

de membrana, y el agua ultra filtrada se almacena en un depósito de hormigón ubicado fuera de la nave industrial de una capacidad de 600 m³. Este depósito se ha diseñado con el volumen necesario para alimentar a la OI y aportar el agua necesaria para la mezcla de la producción de agua osmotizada en una dilución 1:1 y así obtener los caudales requeridos para la inyección de agua en el acuífero.

La ósmosis se alimenta mediante un grupo de bombeo situado en el depósito de acumulación de agua ultrafiltrada. Ésta está compuesta por 4 bastidores compactos de una capacidad de producción de 208 m³/h. El rechazo de la OI vierte en un depósito ubicado dentro de la nave industrial, el cual se ha equipado con dos bombas sumergibles que lo vierten en el emisario existente de la propia planta, y de allí se bombea al mar.

Finalmente, y antes de la mezcla, ambas calidades de agua son desinfectadas por medio de un sistema UV, que tratan el agua por separado. Las aguas, una vez desinfectadas, se almacenan en un depósito de 200 m³ ubicado en el interior de la planta para proceder a la mezcla con una dilución de agua OI y UF de 1:1, y enviarse desde aquí a los pozos.

Bombeo del agua de alimentación

El agua necesaria para el tratamiento avanzado que proviene del tratamiento terciario se acumula en un pozo semienterrado equipado por un grupo de bombeo formado por 3 (2+1R) bombas capaces de suministrar un caudal de 450 m³/h a 25 mca por bomba. Las bombas están gobernadas por la ultrafiltración, y el sistema de bombeo es muy flexible de manera que las bombas ajustan el caudal con la ayuda de un variador de frecuencia en función de los requerimientos de cada tanque. Cada línea necesita un caudal constante de producción de agua ultrafiltrada de 226 m³/h, mientras que cuando un tanque acaba con las limpiezas y se ha de poner en funcionamiento, necesita un caudal de 700 m³/h para que el llenado de cada módulo se

realice en únicamente 5 segundos para poder así rentabilizar al máximo la producción de planta.

Las bombas alimentan a la planta con un colector único de Ø 500 mm a la entrada de cada tren de UF por medio de válvulas automáticas gobernadas por el caudalímetro de entrada a cada línea, el cual ajusta el caudal a la necesidad específica de cada tanque. En cada línea se instala un tamiz de finos de acero inoxidable AISI 316, equipado con un sistema de limpieza automática y con un paso de luz de 500 micras como seguridad antes de la entrada a tanque.

Ultrafiltración

La ultrafiltración es un proceso de tratamiento estrictamente físico y que produce una alta calidad de agua tratada a través de la membrana de fibra hueca. El funcionamiento del flujo es "de fuera a dentro" pasando el agua a través de una membrana que tiene un tamaño de poro nominal y absoluto de 0,02 y 0,1 micras respectivamente. El pequeño tamaño del poro produce un efluente tratado de muy alta calidad con una turbidez < 0,2 NTU, SST<1 mg/l y SDI< 3, lo cual es ideal para la alimentación de una ósmosis inversa. La ultrafiltración es también muy importante para los requerimientos del proyecto de la barrera hidráulica, ya que de esta manera se evita sensiblemente la colmatación física de la rejilla de los pozos de inyección de agua al acuífero.



Figura 3. Detalle de un módulo de membrana UF

Adicionalmente, algunos virus también son eliminados por la combinación de la absorción de éstos en los sólidos contenidos en el tanque de procesos y por la exclusión directa debido a su tamaño (Tabla 5).

La instalación de ultrafiltración está formada por tres trenes independientes para obtener una producción de 14.166 m³/día. Cada tanque contiene 3 casets, y en cada caset se han instalado 57 módulos de membrana. En cada tanque se ha dejado un 5% de reversa (un 15% en el total de la planta) para una posible ampliación sin necesidad de realizar obras adicionales. Los módulos de membrana son el modelo ZW-1000 de Zenon, con una superficie de membrana por módulo de 46,45 m².

Las membranas de ultrafiltración están completamente sumergidas en cada uno de los tanques, y el agua producto se obtiene por una suave succión con bombas horizontales de cámara seca de un caudal de 224 m³/h a 9,94 mca. El agua tratada se almacena en el depósito externo de 600 m³, y también en un depósito interno de 15.000 l de capacidad que se utiliza para los retrolavados de las membranas.

El funcionamiento de las membranas está totalmente automatizado, de manera que gracias a un sistema de válvulas automáticas neumáticas los trenes se alimentan, producen, se rearman en caso de parada y se realizan las limpiezas. En estos sistemas las limpiezas son muy importantes, ya que son las responsables de mantener las membranas con los rendimientos iniciales para no disminuir la producción. Los tanques de membranas precisan tres tipos de lavados, siendo dos de ellos automáticos, el contralavado y el de mantenimiento, y el último, el lavado de recuperación, manual según requerimientos del mantenedor.

El sistema de ultrafiltración está diseñado para que se realice un contralavado automático cuando se tiene una producción de agua del 90%. Cuando se inicia este proceso, primero se airean las membranas durante 15 segundos a fin de producir una agitación completa de las mismas y desprender de su superficie cualquier adherencia, la cual seguirá durante todo el retrolavado y el drenaje del tanque hasta que el nivel de agua dentro del tanque esté por debajo del nivel de las fibras. El grupo soplante está equipado con un impulsor de frecuencia variable para que su velocidad se ajuste en función del nivel de agua para no dañar las membranas. Para finalizar se inyecta agua a contracorriente para limpiar los sólidos que se encuentran incrustados



Figura 4. Vista de los 3 trenes de membranas de ultrafiltración

en las fibras, y esta inyección de agua se realiza mediante un depósito interno de agua UF de 5.000 l y 2 (1+1R) bombas horizontales de 334 m³/h a 11 mca de capacidad cada una.

La secuencia de lavado de mantenimiento se realiza automáticamente una vez al día de forma programada. En esta secuencia es preciso dosificar reactivos químicos de forma que se limpie la superficie de las membranas, y el agua resultante de las limpiezas debe ser neutralizada antes de su vertido al depósito de aguas de lavado. Antes de la limpieza de mantenimiento, la secuencia de aireación y retrolavado va seguida por la de drenaje del tanque, similar a lo que se ha descrito anteriormente. La bomba de retrolavado comenzará a bombear agua con un caudal de aproximadamente 200 m³/h hasta esponjar las fibras y se llenará el tanque al nivel de agua de limpieza. La bomba de dosificación de NaOCl, de ácido cítrico y HCl se encenderán con la bomba de retrolavado y dosificará las sustancias químicas para obtener la concentración establecida en el agua. La duración del enjuague en el tanque de membrana es de aproximadamente 15 minutos. Después de enjuagar el sistema se neutralizan las aguas con bisulfito sódico en el caso de hacer limpiezas con NaOCl, y NaOH. Si se hacen las limpiezas con ácido cítrico, después de unos minutos de recirculación se mide el potencial redox, y si no se indica presencia de cloro residual se drena el tanque. En el caso del ácido se mide el pH y si está correcto se drenará el tanque, sino se repetirá automáticamente esta práctica hasta que la medición de las sondas sea la correcta.

Por último se realiza la limpieza de recuperación cuando la membrana ha perdido efectividad. En esta limpieza el tiempo de dosificación aumenta cinco

veces más en caso de realizarse con hipoclorito, y dos veces en el caso de hacerlo con ácido cítrico, así como el tiempo de enjuague de las membranas que pasa a ser de entre 15 min a 5 h. Esta limpieza requiere la presencia física del personal mantenedor.

Depósito de acumulación de agua ultrafiltrada

Debido al limitado espacio disponible en el interior de la nave, se construyó el depósito de agua ultrafiltrada en el exterior. Este depósito es semienterrado y cerrado para evitar la contaminación de las aguas, teniendo unas dimensiones de 9,90 x 11,40 x 7,80 m. Este depósito de acumulación de agua ultrafiltrada se diseñó con capacidad suficiente para alimentar a la OI de la segunda fase y de añadir los 2.500 m³/día de agua UF para mezclar con la producción de OI de la primera fase y los 5.000 m³/día de la OI de la segunda, para obtener un agua de una dilución 1:1 para ser inyectada. Adicionalmente dispone de un grupo de bombeo preparado para alimentar a la OI, el cual se divide en dos líneas, cada una de ellas formadas por 2 (1+1R) bombas centrífugas multicelulares horizontales encamisadas en acero inoxidable y de una capacidad de 138 m³/h a 3,5 bar cada una.

Por otro lado se ha instalado en el mismo tanque un grupo de bombeo formado por 2 (1+1R) bombas sumergibles de una capacidad unitaria de 380 m³/h. Estas bombas son las encargadas de mezclar el agua de ultrafiltración con el agua de ósmosis, previa a su inyección al acuífero. Para realizar esta mezcla se utiliza un control de funcionamiento de la bomba en PID con un variador de frecuencia. Por tanto realizaremos la suma de los caudales de salida de las dos fases de ósmosis, de manera que el control PID

es el encargado de que el caudal de salida del tanque de UF sea el mismo a dicha suma. De esta forma se logra que en el tanque de inyección llegue un 50% de agua osmotizada y un 50% de agua UF, todas ellas desinfectadas por UV.

Ósmosis inversa

El agua ultrafiltrada es bombeada hacia la siguiente etapa de ósmosis inversa con la finalidad de eliminar más del 95% de la salinidad presente en el agua. La ósmosis se realiza porque el agua del efluente terciario de la EDAR es altamente salina en comparación a la existente en el acuífero antes de la intrusión, debiéndose reducir su contenido salino en un 50% aproximadamente antes de inyectarla.

El sistema de OI está formado por 4 bastidores compactos, diseñados para un caudal total de 208 m³/h de agua osmotizada. Este caudal tiene en cuenta una aportación de agua adicional para la operación del *flushing* que se realizará con agua osmotizada.

Acondicionamiento químico

El acondicionamiento químico necesario y previo al tratamiento por membranas de ósmosis inversa tiene por objetivo el prevenir las precipitaciones y ensuciamientos de las mismas tanto de origen biológico como mineral. Consiste en la dosificación de los siguientes reactivos:

- Antiincrustante
- Bisulfito sódico
- Ácido clorhídrico.

Cada equipo de dosificación está constituido por un tanque de almacenaje individual de capacidad suficiente para mantener una autonomía de funcionamiento de una semana. La dosificación de reactivos se realiza mediante bombas de membrana de accionamiento electromecánico con variación electrónica, realizando la regulación automática y continua en función del caudal y del punto de consigna previsto de dosificación.

Antiincrustante. Al agua ultrafiltrada se le dosifica un producto dispersante y antiincrustante para evitar la precipitación de sales minerales presentes en el agua, las cuales pueden obturar las membranas e incluso hasta perforarlas. Para la dosificación de antiincrustante se utiliza una bomba dosificadora por cada línea (4 en total). Para asegurar su dosificación se ha instalado un controlador de flujo en impulsión que permite la parada del bastidor por falta de dosificación.



Figura 5. Detalle dosificaciones

Bisulfito sódico. Las membranas de poliamida son sensibles a la exposición al cloro libre, de manera que una pequeña cantidad de este elemento puede dañar las membranas de manera irreversible. Es necesario por ello prever la dosificación de un agente reductor que contrarreste el efecto oxidante del cloro. Por seguridad de que la reacción con el cloro libre presente se realice completamente, es recomendable una dosis de 3 ppm. Para la dosificación de bisulfito sódico se utilizan 4 bombas, una para cada línea. La dosificación será regulada por un controlador de potencial Redox.

Ácido clorhídrico. Al agua ultrafiltrada se le dosifica ácido clorhídrico para ajustar el pH del agua de entrada alrededor de 7 - 7,2. Para la dosificación de ácido clorhídrico se utiliza una bomba para cada línea (4 en total). La dosificación será regulada por un controlador de pH instalado a la entrada de cada ósmosis.

Microfiltración de cartuchos

Después del acondicionamiento químico descrito, se emplea una filtración de seguridad mediante filtros de cartuchos con una capacidad de filtración de 5 micras, los cuales sirven para proteger las membranas de OI ante la posible presencia de partículas pequeñas en el agua de aportación. A ésta se la llama filtración de seguridad o de protección de la ósmosis. Los filtros disponen de válvulas de aislamiento, vaciado de las cámaras de agua a filtrar/filtrada y válvula de purga de aire. Además se montaron manómetros individuales para el control de las pérdidas de carga en los colectores de entrada y de salida así como un transmisor de presión diferencial para el control.

Monitorización de los parámetros de agua de aportación

Con la finalidad de asegurar que en todo momento las membranas estén funcionando en unas condiciones adecuadas, en la tubería de alimentación de las bombas de alta presión se instalaron los siguientes controladores en línea:

- pH: Para ajustar y controlar el pH a la entrada de los bastidores.
- P.O.R. (Potencial de oxidación-reducción): Para detectar la presencia de cloro libre a la entrada de los bastidores de OI.
- Conductividad: Para conocer el contenido de sales de agua de aportación y su posible modificación en el tiempo, lo que permite saber si la planta está funcionando adecuadamente y, mediante la comparación con la conductividad del agua producto, detectar posibles ensuciamientos sobre las membranas.
- Temperatura: La temperatura del agua a desalinizar es un parámetro que afecta significativamente al funcionamiento de una planta desaladora (una variación de 1°C puede suponer una alteración del 3% del caudal producido). Una monitorización en continuo de este parámetro permite relacionar su variación con el resto de parámetros de la planta.
- Sistema de medición del SDI: Este índice tiene una relación con los sólidos en suspensión y por tanto puede determinar el correcto funcionamiento del pretratamiento.

Bombeo de alta presión

El agua perfectamente filtrada y acondicionada llega al sistema de bombeo de alta presión, el cual impulsa el agua hacia el interior de las membranas de OI. El agua a tratar tiene una presión osmótica natural de aproximadamente 1,2 a 4,7 kg/cm². Esta presión natural más la presión neta necesaria para la obtención del agua producto calculada, que por las condiciones de diseño es de 12 - 13 kg/cm² y con un caudal de 69,3 m³/h, se obtienen mediante electrobombas de tipo centrifugas verticales sobre bancada multi-etapa de alta presión construidas en acero inoxidable AISI 316.

El accionamiento del motor está controlado por un variador de frecuencia independiente para cada bomba. Las bombas están protegidas para evitar su funcionamiento en seco mediante la instalación de un presostato en la tuberías de aspiración de cada unidad, disponiéndose de válvulas de aislamiento en la entrada y válvulas de aislamiento

y retención a la impulsión, así como un transmisor-indicador de presión situado en la impulsión.

Booster entre 1ª y 2ª etapa

Uno de los principales parámetros de diseño de los equipos de OI es el flujo de trabajo que representa el flujo permeado por unidad de área y por hora, expresado como $l/m^2 \cdot h$. Para los diferentes tipos de agua, el flujo es:

- Agua de pozo: 24-27 $l/m^2 \cdot h$
- Agua de mar: 13-17 $l/m^2 \cdot h$
- Agua de depuradora después de UF: 16-20 $l/m^2 \cdot h$.

También por evitar ensuciamientos de las membranas y por hacer trabajar todas las membranas por igual (lo ideal es un sistema equilibrado) es muy importante que los flujos entre etapas sean lo más próximos posibles. Para poder conseguir esto se instaló una bomba de aumento de presión entre la primera etapa y la segunda. Las bombas previstas son de tipos centrífugas multi-etapa de alta presión de montaje vertical sobre bancada por un caudal de 34 m^3/h a 3-4 kg/cm^2 . Toda la parte hidráulica es de acero inoxidable AISI 316 con cierre mecánico y controlado por un variador de frecuencia para cada bomba.

Bastidores de OI

El agua impulsada por las bombas descritas anteriormente, alimentan las membranas de ósmosis inversa, que están montadas en cuatro bastidores de construcción metálica en AISI-316, produciendo cada uno 52,3 m^3/h y un total de 208 m^3/h .

Membranas y portamembranas

La instalación se construyó con membranas de configuración espiral. Las membranas son de tipo carga neutra y de construcción "low fouling" debido a que deben trabajar con aguas residuales con alta carga orgánica. El material de las mismas es poliamida y especial para aguas salobres de hasta 15.000 ppm, con alta eliminación de sales. El flujo de diseño de las membranas es de 16,7 $l/m^2 \cdot h$ y se ha escogido un flujo relativamente conservador de trabajo para evitar el ensuciamiento de membranas.

Estas membranas se seleccionaron por tener una gran resistencia química y poder trabajar en un rango de pH de 3 a 12, con lo que se confiere una gran facilidad de lavado y recuperación, al admitir gran variedad de productos químicos al lavado. Cada tren de ósmosis está constituido por un paso con doble etapa. Las membranas irán montadas en tubos contenedores construi-



Figura 6. Detalle de los 4 bastidores de ósmosis inversa

dos en PRFV y de salida lateral lo que da lugar a un desmontaje más sencillo, siendo diseñados para poder soportar la presión que la bomba de alta puede proporcionar en casos accidentales.

La presión nominal de los tubos contenedores es de 400 psi y cada uno de los tubos de presión está equipado con una válvula en el lado del permeado que permite la toma de muestras y el muestreo de la calidad del permeado de cada tubo de forma independiente, pudiéndose de ese modo comprobar la integridad de cada uno de los tubos. A cada membrana se le asigna un número de identificación que permite su control en cualquier instante. Esto permite observar la evolución en el tiempo de cada una de ellas, detectar roturas, etc.

En total se montaron 12 tubos portamembranas de 7 elementos por cada bastidor en una distribución de dos etapas, 8 tubos en la primera etapa y 4 en la segunda, siendo 84 membranas de bajo ensuciamiento por bastidor, haciendo un total de 336 membranas.

Instrumentación de control

Con la finalidad de asegurar en todo momento un perfecto funcionamiento de cada bastidor de ósmosis inversa, se han instalado los siguientes elementos de control:

- Transmisor indicador de presión de alimentación: Está instalado en la impulsión de cada bomba de alta y permite ajustar el variador de frecuencia para trabajar y mantener la presión de trabajo.
- Transmisor indicador de presión entre etapas y a la salida de rechazo:

Para determinar un diferencial de funcionamiento defectuoso ya sea por el uso o por una mala manipulación, con lo que se generará una alarma de paro del sistema.

- Caudalímetro de permeado total producido por bastidor y de rechazo: Permite controlar de forma continua el caudal de agua permeada producida por cada etapa, comprobar la conversión a la que está trabajando la planta, y la producción solicitada. Los caudalímetros de permeado y del rechazo son electromagnéticos.
- Conductímetro de agua producto: Permite controlar de forma continua la calidad del agua producida por cada tren.
- Manómetros: Permiten conocer en todo momento las presiones más significativas presentes en el bastidor: entrada, entre etapas, rechazo y de permeado.

Válvulas de regulación, control y tuberías

En cada tren se montarán las siguientes válvulas de control:

- Válvula de control de purga: Se trata de una válvula automática todo-orada del tipo de bola, construcción en acero inoxidable AISI 316 y actuación neumática. La finalidad es evacuar el concentrado producido en las fases pre-lavado, tabla-lavado y desplazamiento con agua osmotizada que se produce en la parada de cada tren.
- Válvula de control de rechazo: Servirá para modificar el factor de conversión de la instalación y está constituida por una válvula automática de control del tipo de asiento, construcción en acero inoxidable AISI 316. Los colectores

de entrada desde la bomba de alta presión a los tubos portamembranas y la salida de rechazo hasta la válvula de regulación de rechazo estarán contruidos en acero inoxidable AISI 316, realizándose la unión mediante enlaces rápidos de tipo Victaulic.

El agua producida por cada membrana sale por el colector central de cada tubo portamembranas, las cuales son conducidas a un colector de permeado de cada etapa donde se controlará el caudal y calidad producida. Los permeados de cada etapa se unen en un colector general de permeados y son conducidos hacia la etapa de desinfección por UV. Las conducciones de permeado están realizadas en PVC PN10. Se dispondrá de una válvula de toma de muestras de en cada tubo portamembranas.

Equipo de limpieza química CIP (Clean in Place)

Todas las instalaciones de membranas tienen con el tiempo un ensuciamiento que depende principalmente del pretratamiento instalado y de las características del agua de alimentación, necesitando efectuar limpiezas de tipo físico-químico. Es importante resaltar que todas estas operaciones de sanitización y de lavado químico se realizando de forma semi-automática sin necesidad de proceder al desmontaje de conexionado de parte del circuito de colectores.

El sistema permite realizar el lavado químico de las etapas por separado para el que se dispone de las correspondientes válvulas de accionamiento manual. Está formado por un equipo de limpieza para los cuatro bastidores de

ósmosis inversa, un depósito por la realización de las mezclas de la soluciones de limpieza (solución ácida y la solución alcalina). Los depósitos disponen de agitador eléctrico y resistencia de calentamiento y hay 2 (1+1R) bombas para recirculación y desplazamiento y un filtro de cartuchos de seguridad.

Desinfección por UV

La luz ultravioleta (UV) es la parte del espectro electromagnético con longitudes de onda entre los 100 y 400 nanómetros (nm). Las longitudes germicidas se sitúan entre los 200 nm y los 300 nm. Los microorganismos se desactivan por medio de la luz UV, siendo ello el resultado del daño foto-químico a los ácidos nucleídos. La mayoría de las bacterias y virus requieren dosis UV relativamente bajas para su desactivación, y en general las bacterias son más sensibles a la luz que los virus. La intensidad de la luz UV se ve afectada por:

- La calidad del agua residual (Turbidez)
- La cinética de desactivación microbiana
- La configuración del equipo o lámpara
- La antigüedad de las lámparas y el ensuciamiento de las fundas
- La transmitancia UV, resultante de la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos que absorben la luz UV
- Total de sólidos suspendidos o más exactamente las características de las partículas que componen el TSS.

Las transmitancia UV es la medida de la capacidad del agua residual para transmitir la luz y un factor importante de diseño para definir el equipo UV. Es por este motivo que, dependiendo de la calidad del agua, el equipo llevará un número de lámparas determinado.

En la planta de tratamiento se han instalado tres equipos de ultravioleta. Dos de ellos están equipados con 18 lámparas cada uno, y diseñados para tratar un caudal de 312,50 m³/h de agua UF. El otro equipo instalado tienen una capacidad de 208,33 m³/h, 12 lámparas y está diseñado para tratar agua OI. El equipo de reserva está diseñado para tratar cualquier tipo de agua, y mediante un juego de válvulas puede ser alimentado tanto por agua UF como por agua OI.

Utilización del agua tratada en la barrera hidráulica

La segunda fase de la barrera hidráulica inyectará en el acuífero 15.000 m³/día de agua resultante de los diferentes procesos de tratamiento descritos, que es el caudal mínimo que se estima necesario según los modelos numéricos para frenar en su totalidad el avance de la intrusión marina en el acuífero. Esta fase prevé, además de la ampliación de la planta de tratamiento avanzado de agua del efluente terciario de la EDAR, la perforación y equipamiento de 11 nuevos pozos de inyección y de 16 nuevos piezómetros, y la ejecución de todas las conducciones necesarias.

Los pozos se han perforado ya y equipado con bombas de limpieza. Además incluyen sistemas automáticos de control individual de caudal y con sondas individuales de conductividad, temperatura y nivel que envían los datos de manera remota al centro de control, situado en la planta de tratamiento del agua en la EDAR de El Prat.

De esta manera, los hidrogeólogos podrán decidir desde la planta el caudal de inyección de cada pozo y variarlo de manera remota haciendo más eficaz el funcionamiento de la barrera.

También se han perforado 16 nuevos piezómetros de control, y han sido equipados también con sistemas automáticos de toma y envío de datos de temperatura, nivel y conductividad del agua. La red de control de la barrera contará así con 51 puntos: 14 pozos de inyección, 17 piezómetros con seguimiento continuo y remoto de nivel, conductividad y temperatura, 12 pozos de industrias existentes, 7 piezómetros existentes de la Agencia Catalana del Agua, y el agua de inyección, lo que constituye la mayor red de control de datos continuos de un acuífero de toda España, y pionera en Europa. Para lo cual se espera que toda la barrera hidráulica al completo pueda estar funcionando a pleno rendimiento en diciembre de 2009.



Figura 7. Detalle de las 3 (2+1 R) unidades de UV

Sistemas de control y primeros resultados de la barrera hidráulica contra la intrusión marina en el acuífero del Llobregat

Hace justo un año publicamos en InfoEnviro (Nº 48 Septiembre 2009, pág. 61) un completo artículo sobre el proyecto de construcción de la barrera hidráulica positiva contra la intrusión salina en el acuífero del delta del Llobregat, basado en la utilización de agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat previamente sometida a tratamientos adicionales de ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección con UV. Si entonces el artículo se centraba en la descripción del proceso de tratamiento para la producción de agua regenerada, esta segunda colaboración nos permitirá profundizar en todo lo relacionado con la red de distribución, los elementos de control del funcionamiento y la compleja red de transmisión de datos asociada hacia los servicios de Hidrología de ACA, así como conocer los primeros resultados del comportamiento de la barrera hidráulica.

Pitarch Navarra, José Luis¹; Caballero Figueroa, Hugo¹ y Ortuño Gobern, Felip²
¹ AREMA, Agua, Residuos y Medio Ambiente S.A., ² Departamento de Planificación, Área de Abastecimiento de Agua, Agencia Catalana del Agua (ACA)

Introducción

El acuífero del delta del Llobregat y su importancia

Los acuíferos asociados al tramo bajo y delta del río Llobregat, situados al oeste de la ciudad de Barcelona (Figura 1), están considerados como una de las

fuentes más importantes y estratégicas de recursos de agua subterránea dentro de las Cuenclas Internas de Cataluña, y especialmente en el ámbito urbano y metropolitano de Barcelona.

Desde mediados del siglo pasado se utilizaron intensivamente sus recursos tanto para el abastecimiento de boca

como para usos industriales, y debido a la proximidad del área metropolitana y a su capacidad de explotación hoy en día todavía son una importante fuente de suministro de agua.

La geología del delta se conoce bien desde mediados del siglo XX. De manera genérica, se puede hablar de la presencia de una cuña de limos y arcillas que separa dos paquetes acuíferos de arenas y gravas: uno superior hasta cotas de -15 m por debajo del terreno actual, sin mucho interés, y otro inferior de cotas de -55 a -70 m aproximadamente. Estos paquetes de arenas y gravas son lo que se conoce como *acuífero superior* y *acuífero principal* respectivamente. El *acuífero principal* es el de mayor importancia y el que concentra la mayor parte de las extracciones de agua subterránea, tanto para uso industrial como para uso de boca.

El problema de la intrusión marina

El acuífero principal del delta del Llobregat está afectado por intrusión marina, ya que tiene un descenso piezométrico generalizado bajo el nivel del mar desde principios de los años 70, producto de la sobreexplotación. Ello ha comportado la aparición y el avance del agua del mar en el acuífero, facilitado también por las excavaciones de la capa impermeable de contacto entre el acuífero y el mar en el puerto, lo que ha originado un empeoramiento progresivo de la calidad del agua subterránea. Las cuñas de intrusión marina (Figura 2)

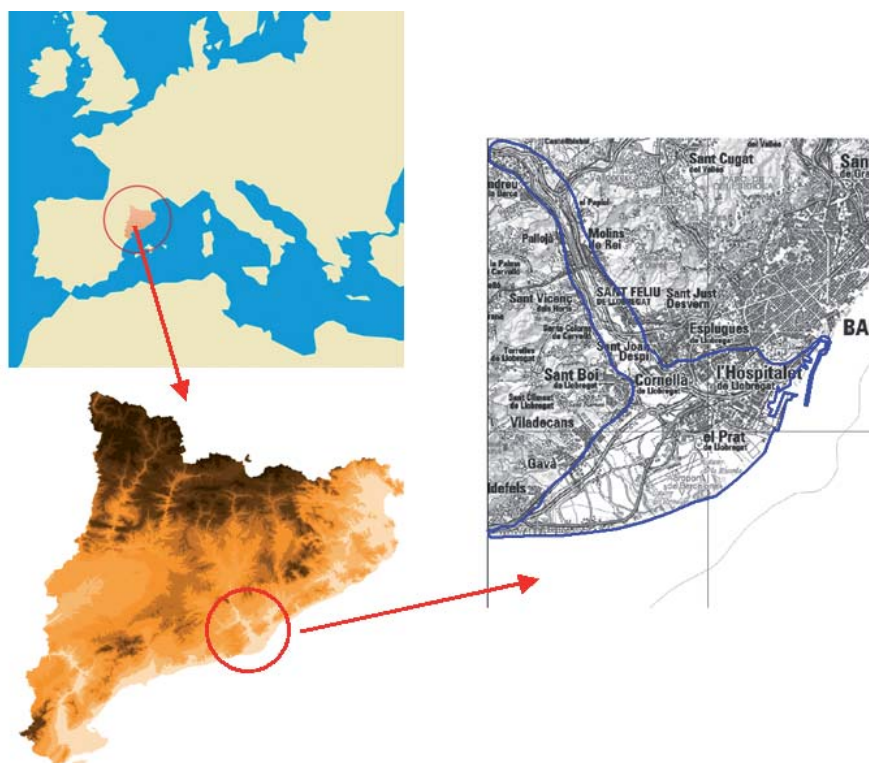


Figura 1. Situación de los acuíferos del valle bajo y delta del Llobregat

avanzan actualmente por la Dársena del Puerto en la Zona Franca y por la Ricarda, ocupando actualmente una tercera parte de la superficie del delta.

El proyecto de la barrera hidráulica para frenar la intrusión salina

Para detener el avance de la intrusión marina en el acuífero, la Agencia Catalana del Agua (ACA) está llevando a cabo, entre otras acciones de recarga artificial en el acuífero, la construcción de una barrera hidráulica positiva mediante la inyección de agua regenerada tratada en 14 pozos. Es el primer proyecto de estas características que se realiza en España y pionero en Europa.

La barrera eleva el nivel de agua del acuífero cerca de la costa y evita que el agua salada penetre tierra adentro, utilizando para ello agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat (Barcelona) con tratamientos adicionales de ultrafiltración, ósmosis y desinfección.

La barrera se ha implementado en dos fases (Figura 3). La primera fase, elaborada por la sociedad Depurbaix y transferida en el año 2008 a la ACA, mantuvo un caudal de inyección de 2.500 m³/día en tres pozos. Entró en funcionamiento en marzo de 2007 con resultados altamente positivos, ya que se ha observado una mejora substancial de la calidad del agua subterránea en los pozos cercanos a los puntos de inyección y no han aparecido fenómenos de colmatación. La segunda fase, en operación desde abril de 2010, ha sido realizada íntegramente por ACA, pudiendo alcanzar un caudal de inyección de 15.000 m³/día con la construcción adicional de 11 pozos más de inyección y

Fase	Caudal (m3/día)	no. pozos	En operación
1 (piloto)	2.500	4	Marzo 2007
2	15.000 (total)	14	Abril 2010

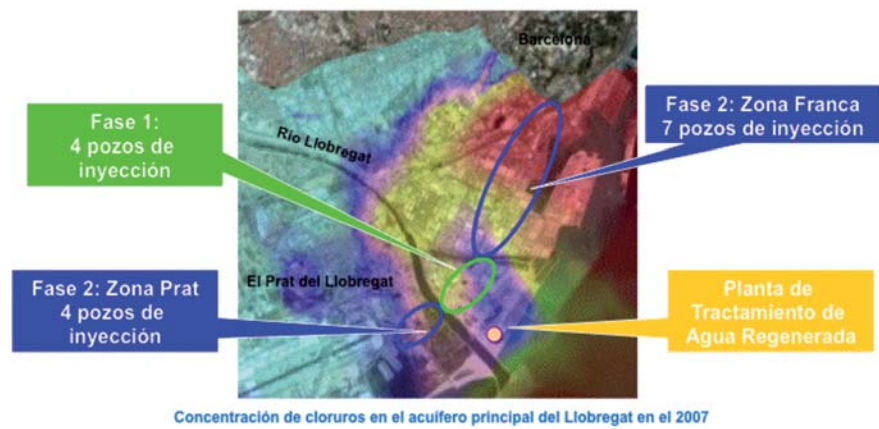


Figura 3. Situación de las fases del proyecto de barrera hidráulica. Se indican el número de pozos de inyección y de piezómetros de control para cada fase

de 16 piezómetros de control específicos en el acuífero.

Las obras de construcción de la segunda fase fueron adjudicadas en abril de 2008 a la empresa Agua, Residuos y Medio Ambiente S.A. (AREMA). En su conjunto, la inversión total del proyecto ha sido de 23 M€ aportados por la ACA, el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, y la Comunidad Europea. La explotación de las instalaciones, tanto la de producción de agua regenerada como la de toda la red de inyección (1ª y 2ª Fase) está a cargo de la empresa AREMA.

Instalaciones de la barrera hidráulica

Las instalaciones de la barrera hidráulica están formadas por: 1) la planta de tratamiento de agua; 2) los pozos de inyección de la misma al acuífero; 3) la red de distribución, que lleva el agua desde la planta a los pozos; y 4) los piezómetros de control del acuífero, para evaluar el efecto hidrogeológico de la barrera y su comportamiento. La planta de tratamiento de agua no se describe aquí ya que fue motivo de un artículo anterior en esta misma revista.

La red de distribución de agua

La red de distribución tiene como objetivo transportar el agua desde la planta de tratamiento a los pozos de inyección encargados de la recarga del acuífero para la barrera hidráulica. Esta actuación se centra en la instalación en zanja de un colector de PEAD. El colector se divide en dos ramales: Ramal Carrer A (Sector Barcelona) y Ramal zona Prat (Sector El Prat de Llobregat).

Para el **Ramal Carrer A (Sector Barcelona)** la zona de inicio de este sector discurre desde el Polígono Pratenc, donde finaliza la conducción de la 1ª fase por el lateral del Carrer A del Polígono Industrial de la Zona Franca de Barcelona. Durante el trazado se ha cruzado el antiguo lecho del río Llobregat y está formado por tubería de PEAD PE100 PN10 y con diámetros que oscilan entre DN 400 y DN 200. Esta tubería está soldada por termofusión, con una longitud aproximada de 3.400 m.

Toda la longitud del trazado se divide en dos partes en función del método de ejecución, si la conducción ha sido en zanja o bien mediante una perforación horizontal dirigida (PHD) a fin de minimizar los servicios afectados de la zona de gran concentración de industrias y del tránsito asociado (Figura 4). La ejecución de este ramal ha comportado la ejecución de un total de cinco perforaciones horizontales dirigidas para evitar servicios existentes en el trazado del colector o evitar al máximo las interferencias con el tránsito rodado y ferroviario de la zona de las obras. Este sector consta de 10 pozos de inyección, de los cuales 3 son aéreos ubicados en casetas de obra civil y el resto son semienterrados con acceso a través de compuertas hidráulicas.

El **Ramal Zona Prat** se inicia en la conducción general de abastecimiento que procede desde la planta de tratamiento y antes del paso por el pozo 1 de la primera fase de las obras. Está formada por tubería de PEAD PE100 PN10 también soldada por termofusión, con una longitud aproximada de 3.600 m y con diferentes diámetros.

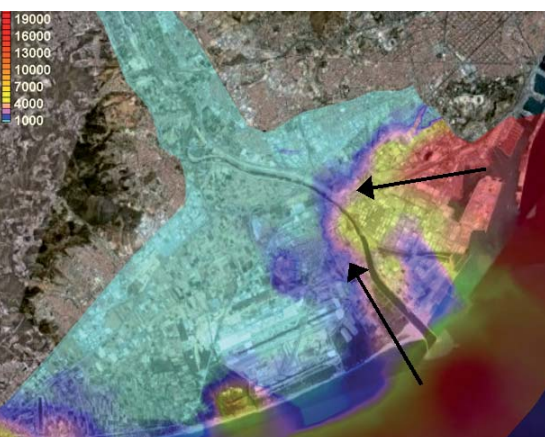


Figura 2. Concentración de cloruros en el acuífero principal del Llobregat en 2007 (datos de ACA). La intrusión marina afecta ya una tercera parte de la superficie del delta y progresa desde el mar tierra adentro por el Puerto (al norte) y por la Ricarda (al sur) en el sentido que indican las flechas



INGENIERÍA
CONSTRUCCIÓN
OPERACIÓN
INVESTIGACIÓN



AREMA
AGUA, RESIDUOS Y MEDIO AMBIENTE



El cruce por debajo del río Llobregat se efectúa mediante el paso de la conducción por el interior de una galería de servicio. En el interior de la mencionada galería la tubería discurre por la parte inferior de uno de los alzados del túnel. A fin de evitar posibles movimientos en la conducción, ésta se ancla de forma mecánica al suelo mediante anclajes metálicos. Este sector consta de 4 pozos de inyección, todos ellos son aéreos ubicados en casetas de obra civil forradas en madera y distribuidas a lo largo del trazado.

Descripción de los pozos de inyección

La ejecución de estos pozos se ha hecho a partir de unas estrictas premisas dictadas por la ACA, en función del método constructivo de la primera fase, de los resultados obtenidos y de la experiencia de la explotación obtenida en esa obra. Su perforación se ha realizado mediante dos técnicas diferentes: en un caso se ha ejecutado una perforación mediante rotación inversa con lodos bentoníticos y en el otro caso con circulación inversa con agua y cabezal dual.

Los pozos tienen una profundidad aproximada de entre 60 y 75 m, hasta atravesar totalmente el acuífero profundo del delta del Llobregat y se han ejecutado con tubo ranurado únicamente en esa zona de profundidad del acuífero que es donde se efectúa la inyección de agua. El fondo de la perforación se rellena con bentonita que actúa como tapón de fondo, con un grosor de 1,5 m.

La zona ranurada para la inyección del agua en el acuífero y hasta un metro por encima de la misma se recubren anularmente con grava de entre 5 y 8 mm que actúan como prefiltro, y por encima de este empaquetamiento de grava se re-



Figura 4. Detalle de la zanja de ubicación de las tuberías

llena con bentonita en pellets para separar la zona de inyección de la zona superior que se rellena con una lechada de cemento, de manera que la bentonita siempre queda por encima del nivel superior del acuífero, aislándolo. El cemento sirve como material sellante hasta la superficie, lo que garantiza que no se comuniquen las aguas de este acuífero con las del superficial que se encuentra entre 5 y 10 m.

Todos estos pozos están equipados con una tubería de alimentación de agua al acuífero procedente de la red de distribución en acero inoxidable, una tubería de salida de agua de lavado de los pozos, unida a una electrobomba sumergible, que va a una red de drenajes. El lavado, que se realiza periódicamente, es crucial en este tipo de pozos para prevenir fenómenos de colmatación en los mismos, lo cual es la principal causa de fracaso en estas experiencias.

Equipamiento y funcionamiento de los pozos

El equipamiento existente en todos los pozos es casi idéntico, al igual que la programación de los mismos, existiendo mínimas diferencias entre los pozos semienterrados y los aéreos (Figura 5). Tan sólo en los pozos semienterrados existe alarma de inundación que equipa una bomba de achique automática.

Cada pozo incorpora en la línea de alimentación un caudalímetro para medir el caudal de inyección, una electroválvula reguladora de caudal y una ventosa bifuncional para la extracción de aire en el punto más alto.

En la línea de limpieza, los pozos tienen un caudalímetro, una electrobomba multicelular sumergida controlada por variador de frecuencia y en el interior de la perforación se instala una sonda multiparamétrica que mide valores de temperatura, nivel piezométrico y conductividad eléctrica del agua, gestionando los datos a tiempo real. Estas sondas van protegidas por un tubo de PVC hasta la casi totalidad de la profundidad del pozo, cuyos últimos 3 m están ranurados para permitir el paso de agua a la sonda.

El caudal de inyección de cada pozo se establece desde la sala de control de la planta de tratamiento de agua, en base a la transmisividad de acuífero y a los efectos en el mismo que evalúan casi diariamente los técnicos de la ACA. Las válvulas motorizadas de cada pozo son las encargadas de regular el caudal de agua, hasta alcanzar el valor del "set point" establecido. Su regulación está



Figura 5. Detalle del equipamiento interno de un pozo

determinada por la lectura del caudalímetro de inyección.

En la sala de control, instalada en la planta de tratamiento de agua en la EDAR, se visualiza para cada uno de los 14 pozos la consigna de caudal, el caudal de inyección a tiempo real, el nivel del pozo y la conductividad eléctrica del agua. La inyección de agua a los pozos es en continuo, las 24 horas del día, y se hace por gravedad venciendo la contrapresión del acuífero de forma que la entrada en éste sea en el régimen lo más laminar posible, ya que la inyección de aire puede provocar la inutilización del pozo. También hay instalada una alarma de nivel para detener la inyección y evitar inundaciones, y una alarma de intrusión que detecta el acceso no autorizado a cada pozo.

Periódicamente se realizan las limpiezas de los pozos. Consisten en parar momentáneamente la inyección para realizar un contralavado con las bombas sumergibles, limpiando de esta manera las rejillas de los pozos con la finalidad de eliminar los residuos que puedan estar reduciendo su permeabilidad. Esta operación se realiza de modo manual, ya que requiere de diversas comprobaciones de caudal y de nivel *in situ* y toma de muestras. El caudalímetro de limpieza recogerá el volumen de agua extraído durante cada operación.

Los piezómetros de control y la red de seguimiento

Para evaluar el comportamiento de la barrera también se han previsto la perforación, instalación e instrumentación de una serie de piezómetros para su red de control. Para ello se han ejecutado un total de 16 nuevos piezómetros de control, que están equipados con sondas multiparamétricas para la toma de datos de temperatura, conductividad eléctrica del agua y nivel en el acuífero, y de ese modo poder tener el control del acuífero en todos los puntos establecidos.

Los trabajos de perforación de los nuevos piezómetros se han llevado a cabo con el sistema de rotación con circulación inversa, utilizando agua con un espumante biodegradable como fluido de perforación. El diámetro de perforación ha sido de 210 mm, adecuado para la entubación y finalmente con tubo de PVC-U de diámetro interno de 160 mm. Ello permite tanto la toma de muestras de agua como la inclusión de diferentes sondas hasta el acuífero.

Los piezómetros han quedado protegidos en la zona superior mediante una caja metálica de acero inoxidable, homologada por la ACA. Todos estos piezómetros poseen una antena para comunicaciones GPRS para la transmisión horaria de los datos que queda ubicada dentro de la tapa de protección de los mismos. Únicamente los piezómetros ubicados en el interior de la zona bajo competencia de la autoridad portuaria, así como el ubicado en el Carrer 60 de la Zona Franca, han sido protegidos con tapas de fundición de 60 cm de diámetro, típicas de los pozos de registro. En estos casos se ha tenido que instalar una antena para comunicaciones GPRS externa para permitir la correcta comunicación de los mencionados piezómetros con el resto de la red.

La red de control y seguimiento de la ACA para la barrera se completa, además de los 16 piezómetros con seguimiento continuo y remoto de nivel, conductividad y temperatura, con 12 pozos de industrias y 8 piezómetros ya existentes (Figura 6).



Figura 6. Red de control para la segunda fase de la barrera hidráulica en el Llobregat. Además de los 14 pozos de inyección (en rojo) se realizará el seguimiento con 16 nuevos piezómetros automatizados con sondas remotas de temperatura, nivel y conductividad (en verde), 7 piezómetros existentes y 12 pozos industriales

Recogida, transmisión y procesado de datos

La evaluación continua del estado del acuífero, así como el ajuste de los parámetros óptimos en los pozos de inyección y en el agua que se inyecta, garantizan el buen funcionamiento y la estabilidad de la barrera. Ello requiere una obtención constante de datos en tiempo real, los cuales no sólo son evaluados instantáneamente para ajustar la dinámica de la inyección en los pozos sino que son analizados mediante diversos formalismos "a posteriori" con el fin de extraer conclusiones acerca de la evolución del sistema y mejorar los modelos matemáticos del acuífero contrastando las predicciones.

Topología de la red e intercambio de datos

El sistema de recogida y transmisión de datos, así como el tratamiento parcial de los mismos, está basado en una red de autómatas programables. La elección de estos componentes obedece a la necesidad de efectuar tareas de gestión más complejas que las presentes habitualmente en los "dataloggers" comerciales y a la voluntad de dotar al sistema de la máxima flexibilidad en vista a futuras ampliaciones, tanto en las tareas de control como en la adquisición de datos.

La implementación del funcionamiento descrito anteriormente presupone un intercambio de datos en tiempo "cuasi" real entre cada uno de los pozos y la

```
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:04:31";26,21528;1:40461003141,0185
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:04:37";26,21528;1:40461003200,4514
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:04:42";26,21528;1:40461003260,3472
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:04:47";26,21528;1:40461003319,2708
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:04:52";26,21528;1:40461003379,8032
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:04:57";26,21528;1:40461003439,9884
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:02";26,21528;1:40461003499,4792
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:08";26,21528;1:40461003559,5486
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:13";26,21528;1:40461003619,0972
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:18";26,21528;1:40461003678,287
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:23";26,21528;1:40461003736,8056
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:28";26,21528;1:40461003796,8400
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:33";26,21528;1:40461003855,6011
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:38";26,21528;1:40461003915,2199
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:44";26,21528;1:40461003975,9722
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:49";26,21528;1:40461004035,6019
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:54";26,21528;1:40461004095,2778
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:05:59";26,21528;1:40461004153,8426
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:06:04";26,21528;1:40461004212,9514
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:06:09";26,21528;1:40461004273,0787
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:06:14";26,21528;1:40461004331,8634
"TEMP_INJECCIO";"10.10.2010 00:06:19";26,21528;1:40461004391,4236
```

Figura 7. Archivo de datos original en formato CSV, el cual recoge todos los datos de los pozos de inyección de la barrera hidráulica

central de gestión, ubicada en la EDAR Baix Llobregat. Por tanto, en la definición de los datos concernientes a cada pozo existe un vector de datos de entrada, transmitidos en la dirección EDAR → POZO y uno de datos de salida, en la dirección POZO → EDAR.

Como punto de partida se han establecido los siguientes vectores de datos para cada pozo:

- Entradas (EDAR → POZO)
 - Caudal instantáneo de inyección deseado
 - Cota máxima del nivel de agua en el pozo permitida
 - Tiempo de limpieza máximo permitido
- Salidas (POZO → EDAR)
 - Cota absoluta del nivel de agua en el pozo
 - Temperatura en las proximidades de la rejilla de inyección (+/- 0,6 m)
 - Conductividad en las proximidades de la rejilla de inyección (+/- 0,6 m)
 - Volumen total inyectado en el pozo
 - Volumen de limpieza total extraído del pozo

Todos los datos son encriptados y transmitidos a la EDAR mediante tecnología GPRS. Para ello, cada pozo está equipado con un router 3G/UMTS, existiendo en la EDAR una conexión basada en tecnología WiMAX. Obviamente, junto a los datos de proceso se transmiten datos de control, los cuales permiten la verificación del estado de las comunicaciones, prestándose especial atención a los niveles de cobertura de señal en los diferentes pozos.

Medidas de seguridad

Una de las piedras angulares del sistema de control implementado se basa en la garantía de la seguridad, la cual abarca las siguientes medidas: seguridad del proceso, de las personas y de los datos.

Si bien es cierto que no existe una línea divisoria clara entre el primer y segundo punto, se pueden establecer medidas de seguridad propias para cada uno de los aspectos mencionados.

Las medidas de seguridad del proceso tienen por objeto garantizar que éste se ejecuta dentro de los límites deseados. Para ello, además de las consignas descritas en los vectores de datos con anterioridad, existen subsistemas e instrumentación de refuerzo para minimizar el impacto de errores. Entre ellos figura la existencia de interruptores de nivel en caso de inundación, el funcionamiento autónomo del PLC local en caso de pérdida de las comunicaciones con los pozos y la desconexión de las protecciones principales en caso de detección de inundación. Todos estos eventos generan alarmas que son transmitidas a la planta con el fin de informar a los operarios de modo que éstos puedan tomar las medidas pertinentes, según los protocolos preestablecidos.

Asimismo, las medidas de seguridad de las personas, cuya finalidad es evitar que cualquier persona resulte lesionada por acción directa o indirecta, incluyen, entre otras, la detección de intrusión a los pozos, con el fin de evitar accesos no autorizados, los equipamientos de mando y protección eléctricos monitorizados por el PLC y los "interlocks" entre diferentes subprocesos; todos ellos son monitorizados desde la EDAR.

Por último, la seguridad de los datos tiene como objetivo garantizar que los mismos no han sido manipulados, así como evitar accesos no autorizados a los sistemas, incluyendo la introducción y/o modificación de datos en las bases de datos de los procesos o la eliminación de la información existente. Para ello el sistema implementa diferentes medidas de seguridad como son: redes privadas virtuales (VPN), que permiten la comunicación extendiendo la red local sobre la red pública con las respectivas garantías de confidenciali-

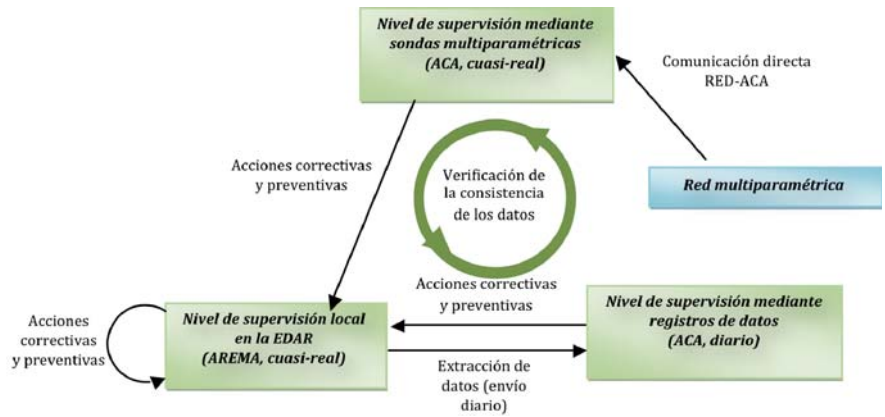


Figura 8. Niveles de supervisión de los datos del proceso

dad de la información, firewalls en todos los extremos de las comunicaciones, filtrado MAC, etc.

Tratamiento de datos

Los datos, recogidos en tiempo cuasi-real, son preprocesados en la EDAR con el fin de producir unos ficheros compatibles con el sistema de gestión de la ACA. Originalmente, los datos son recogidos con una frecuencia de 720 muestras/h para cada variable, produciéndose ficheros CSV (Figura 7) por cada una de ellas en los que, además del nombre de la variable y el momento de su recogida, se incluyen otras informaciones como la validez del dato, entre otras informaciones de control.

El preprocesado de datos extrae una muestra representativa de dichos ficheros de acuerdo a una frecuencia de muestreo ajustable por el Servei d’Hidrologia de la ACA, siendo ésta actualmente de 1 muestra/h para cada una de las variables. Obviamente, la frecuencia máxima seleccionable está restringida a 720 muestras/h, coincidiendo con la frecuencia de grabación de los datos originales.

Los datos transmitidos al Servei d’Hidrologia de la Agencia Catalana del Agua son los siguientes:

- Parámetros asociados a los pozos:
 - Cota absoluta del nivel de agua en cada pozo
 - Temperatura en las proximidades de la rejilla
 - Conductividad del agua en las proximidades de la rejilla
 - Volumen total inyectado
- Parámetros asociados a la planta de tratamiento e impulsión situada en la EDAR:
 - Turbidez del agua en el recinto de impulsión
 - Conductividad del agua en el recinto de impulsión
 - pH del agua en el recinto de impulsión
 - Temperatura del agua en el recinto de impulsión
 - Contenido de amonio en el recinto de impulsión
 - Volumen total de alimentación a la planta de tratamiento
 - Volumen total de agua ultrafiltrada
 - Volumen total de agua osmotizada
 - Volumen total impulsado a los pozos
 - Consumo eléctrico de la planta de tratamiento

Todos estos datos, tras el preprocesado, son fusionados en un único fichero que es transmitido al citado Servei d’Hidrologia diariamente, utilizando para ello una segunda conexión basada en tecnología WiMAX, independiente de la conexión dedicada a la comunicación con los pozos. La correcta transmisión de los ficheros es verificada activamente, generándose "logs" diarios en los que se recogen los resultados de las comunicaciones cliente-servidor.

Supervisión del proceso

Debido a la complejidad del proceso y con el fin de garantizar la independencia en la evaluación de los resultados, se ha establecido un sistema jerárquico de supervisión compuesto por los siguientes niveles (Figura 8):

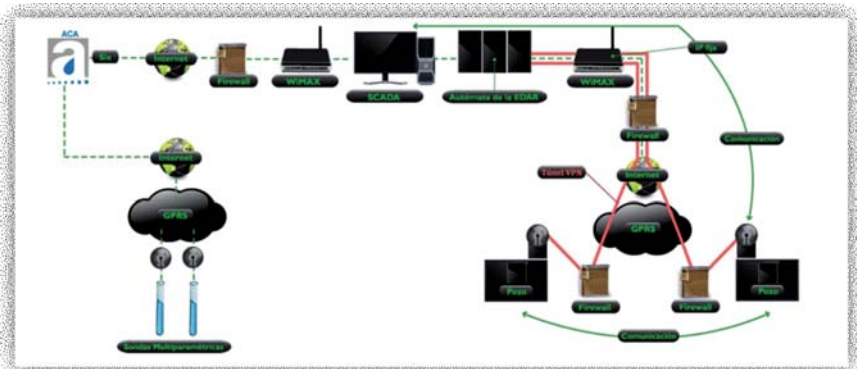


Figura 9. Diagrama de la red de comunicaciones

- Nivel de supervisión local en la EDAR (AREMA, cuasi-real)
- Nivel de supervisión mediante sondas multiparamétricas (ACA, cuasi-real)
- Nivel de supervisión mediante registros de datos (ACA, diario).

El primer nivel de supervisión consiste en la verificación de los datos intercambiados entre la red de autómatas situados en los pozos y la central de procesos que se encuentra en la EDAR, este nivel de supervisión se denomina *Nivel de supervisión local en la EDAR*. A pesar de que todo el proceso se realiza de forma automática, la supervisión de los operadores garantiza el correcto funcionamiento de las instalaciones.

Diariamente, tal como se ha explicado con anterioridad, se envía una submuestra de los datos obtenidos al Servei d'Hidrologia de la ACA para que proceda a su verificación. Con ello se produce el segundo nivel de supervisión, denominado *Nivel de supervisión mediante registros de datos*. El análisis de estos datos permite la aplicación de acciones correctivas y/o preventivas en función de los criterios de explotación del Servei d'Hidrologia.

Por último, existe un nivel de supervisión en tiempo cuasi-real, denominado *Nivel de supervisión mediante sondas multiparamétricas*, el cual supervisa de forma constante todo el sistema, permitiendo la determinación de las acciones necesarias para la consecución de los objetivos de la instalación. Este nivel de supervisión obtiene los datos directamente de una red multiparamétrica, en la que se registran la cota absoluta del nivel de agua, la temperatura y la conductividad en el lugar de instalación de cada uno de los sensores existentes.

Este nivel de supervisión, cuyos datos son ajenos a los procesos de la EDAR y los registros obtenidos de los pozos, garantizan la independencia del análisis del Servei d'Hidrologia, la cual establece una comunicación punto a punto con la red de sondas multiparamétricas sin que se produzca ninguna otra intervención externa, siendo ésta la única receptora de dicha información.

En resumen, debido a la trascendencia de la correcta explotación y el mantenimiento de las instalaciones, teniendo en cuenta que de su gestión depende la conservación de los acuíferos y, por tanto, el abastecimiento a distintos núcleos de población, se han establecido niveles de supervisión suficientes e independientes para garantizar que la correcta explotación, así como los resultados reportados, no contienen errores y reflejan la realidad de los acuíferos, cotejándolos con datos tomados directamente en tiempo cuasi-real por el Servei d'Hidrologia mediante una red privada de sensores multiparamétricos de acceso restringido. El diagrama conjunto de la red de comunicaciones se muestra en la Figura 9.

Comportamiento de la barrera hidráulica

Volumen de agua inyectada y colmatación en los pozos de inyección

La inyección de agua en el acuífero empezó el 26 de marzo de 2007 y desde el mes de abril del 2010 que la barrera se encuentra completamente operativa al entrar en funcionamiento su segunda fase. Desde su inicio se han inyectado ya algo más de 2.000.000 m³ de agua regenerada altamente tratada en el acuífero, con calidad de agua potable. No se han observado hasta la fecha fenómenos de colmatación en los pozos de inyección, debido principalmente a la alta calidad de agua (ultrafiltrada y osmotizada) y al estricto programa de limpieza impuesto.

Mejora global de la calidad del agua del acuífero

Globalmente el impacto de la barrera sobre el acuífero ha alcanzado a todos los puntos de observación de la primera fase y a algunos de la segunda fase, los más cercanos a los nuevos pozos de inyección. La magnitud de ello depende de la distancia desde los puntos de inyección a los de observación y de las características del medio subterráneo.

En los puntos de observación del acuífero de la primera fase la conductividad eléctrica ha disminuido claramente desde el inicio de la inyección del agua.



Figura 11. Impacto estimado de la barrera hidráulica en el acuífero del Llobregat a mayo de 2009. El mapa muestra las diferencias entre las concentraciones de cloruros de mayo de 2007 a mayo de 2009, indicando la mejora de la calidad del agua subterránea por la barrera

Han disminuido las concentraciones de cloruro (Figura 10), sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfato y amonio, manteniéndose estables los bicarbonatos.

Los nitratos han aumentado ligeramente ya que el contenido inicial en el acuífero es nulo y están ligeramente presentes en el agua de inyección (5,8 mg/l).

El pozo industrial Gearbox Prat, situado a 257 m del pozo de inyección P3, es donde los efectos de la barrera han sido mayores, bajando la conductividad progresivamente de 16.500 a menos de 2.800 µS/cm, lo que representa pasar de contenidos en cloruros en el agua subterránea de 6.500 mg/l a menos de 680 mg/l.

La extensión del impacto en el acuífero provocada por la barrera puede estimarse mediante la diferencia de las concentraciones de cloruros de años consecutivos (Figura 10). Para este caso se han escogido las fechas de mayo de 2007 y mayo de 2009, cuando se muestra, además de la red de control de la barrera, la red regional de observación de la Agencia en el delta del Llobregat y se tiene un mayor número de puntos. En base a ello, la mejora de la calidad del agua por la inyección de la barrera puede estimarse que ha llegado en un año hasta una distancia de 1 a 2 km de los pozos de inyección (Figura 11).

Los buenos resultados obtenidos hasta la fecha indican que tanto el equipamiento como la tecnología del proyecto de la barrera hidráulica son válidos y eficaces para frenar la intrusión marina en el acuífero, y que en pocos años se espera la recuperación de la calidad de esta estratégica reserva para el abastecimiento de agua a la ciudad de Barcelona y a sus municipios circundantes.

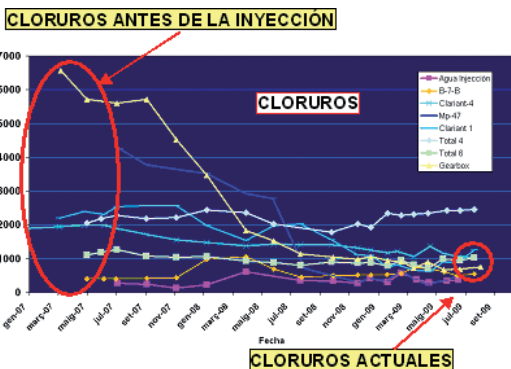


Figura 10. Evolución del contenido en cloruro en el acuífero en los puntos de observación de la primera fase de la barrera hidráulica desde el inicio de la inyección. La salinidad ha disminuido en la mayoría de los puntos de control