

La Ultrafiltración como etapa de mejora en una ETAP convencional

Autores: Fernando Valero⁽¹⁾ (Jefe de I+D+i y Control de Proceso, fvalero@atll.cat), Pere Emiliano⁽¹⁾ (Técnico de I+D+i y Control de Proceso, pemiliano@atll.cat), Ramón Garrote⁽²⁾ (Ingeniero de Soporte Técnico, rgarrote@hydranautics.es), Miguel Ángel Rodríguez⁽²⁾ (Ingeniero de Soporte Técnico, mrodriguez@hydranautics.es), María Neculau⁽²⁾ (Ingeniera de Soporte Técnico, mneculau@hydranautics.es), Florin Vartolomei⁽²⁾ (Gestor de Proyectos EMEA, fvartolomei@hydranautics.es), Jose Javier Rodríguez⁽¹⁾ (Jefe de Planta ETAP Ter, jjrodriguez@atll.cat)

⁽¹⁾ ATLL Concessionària de la Generalitat de Catalunya S.A.

⁽²⁾ Hydranautics-Nitto Group

Resumen:

La evolución de la legislación relacionada con el agua de consumo se orienta a conseguir una mayor calidad del producto, reduciendo la adición de reactivos químicos y una menor formación de subproductos. La administración de la Generalitat de Catalunya se plantea la remodelación de la ETAP del Ter, inaugurada en 1965, y con una capacidad máxima de tratamiento actual de 8m³/s. De esta manera ATLL como operadora del sistema, ha estudiado la incorporación de nuevos procesos como las membranas a través de la tecnología de la ultrafiltración (UF). La UF puede ser una substituta parcial o total de la etapa de clarificación y filtración y puede también servir para aumentar la garantía sanitaria del agua recuperada del proceso que puede de nuevo incorporarse a su inicio. Así se han realizado tres estudios consecutivos, alimentando una planta piloto con agua decantada, con agua cruda y con agua de procedente de los lavados de filtros de carbón y purgas de decantadores, que después se recircularía a cabecera del tratamiento.

Trabajando con agua procedente del proceso de clarificación se ha obtenido una reducción de turbidez del 69,1±13,4%, eliminando también los parámetros microbiológicos y parte del aluminio residual procedente del proceso de coagulación. En la segunda fase del estudio, alimentando la planta piloto de UF con agua cruda sin ningún tratamiento, la reducción de turbidez ha sido del 91,1±4,5%. Se ha obtenido una desinfección física con reducción de bacterias y protozoos en el flujo de permeado. La turbidez obtenida ha sido inferior a la del agua clarificada, lo que supondría una mejor calidad para el agua que alimenta la etapa posterior de filtros de carbón activo. En este caso se ha eliminado un 12,3±4,0% de la materia orgánica presente, la concentración de hierro y manganeso obtenida ha sido parecida a la salida de planta de la ETAP y la concentración de aluminio muy inferior en el flujo de permeado. La tercera parte del estudio se está realizando actualmente.

La UF se ha mostrado como una tecnología robusta y compacta, capaz de trabajar con agua de distintos orígenes y características, manteniendo siempre una calidad constante y correcta del flujo de permeado, y reduciendo la dosificación de reactivos químicos. Por lo tanto, es una opción a tener en cuenta para implementar parcial o totalmente en el proceso de tratamiento de la ETAP Ter a pesar del incremento en los consumos energéticos del tratamiento.

Abstract:

The draft of the new water legislations aims at produce water with better quality through the reduction of chemical reagents dosage; therefore the byproducts formation will be also reduced. Catalan administration raises the need to rehabilitate Ter DWTP, which started up the operation in 1965. This plant has a conventional treatment with a maximum treatment capacity of 8 m³/s. ATLL operates the system and it has studied the possibility to include new membrane processes through ultrafiltration technology (UF). UF can partially or totally substitute the clarification and filtration step. UF can also increase the sanitary guarantee of recycled water of the process. This water is recycled up to inlet of the plant. It has been carried out three consecutive pilot studies in different treatment points. Pilot plant has been fed with clarified water, raw water without any pre-treatment and water from filters backwash and clarifiers purges.

Feeding the pilot plant with clarified water, a turbidity reduction of $69,1 \pm 13,4\%$ is obtained. Microbiological parameters and some residual aluminium from coagulation process are also removed. In second part of study a turbidity reduction of $91,1 \pm 4,5\%$ is obtained. It shows the physical disinfection of permeate. Bacteria and protozoa are totally removed. Permeate turbidity has been lower than clarified water, therefore carbon filters could be fed with high quality water. In this case organic matter is $12,3 \pm 4,0\%$ removed. Iron and manganese concentration in ultrafiltration permeate are similar than product water of DWTP. Aluminium concentration are lower in permeate. Third study phase is now in progress.

Obtained results show ultrafiltration as a robust and compact technology. It is able to work with water with different origin and characteristics, but maintaining good and constant permeate quality and reducing the chemical reagents dosage. As a result, UF is an option to totally or partially implement in Ter DWTP treatment process although it supposes an increase of energy consumption.

1 Introducción

La estación de tratamiento de agua potable (ETAP) del Ter, operada por ATLL Concessionària de la Generalitat de Catalunya S.A., se encuentra en el término municipal de Cardedeu y fue inaugurada y puesta en marcha el año 1965; tiene un caudal máximo de tratamiento de 8 m³/s y forma parte de la red Ter-Llobregat para el abastecimiento en alta de Barcelona y su área metropolitana, lo que supone un total de 4,5 millones de personas. Se trata de una ETAP que capta agua del río Ter, directamente del sistema de embalses Sau-Susqueda-Pasteral a través de una conducción subterránea a lámina libre de 56km, y que tiene un tratamiento convencional formado por una pre-oxidación con cloro y dióxido de cloro, un proceso de coagulación-floculación con policloruro de aluminio y almidón modificado en 8 decantadores tipo Pulsator, seguido de 48 filtros de carbón activo, y finalmente una desinfección con hipoclorito de sodio (Figura 1).

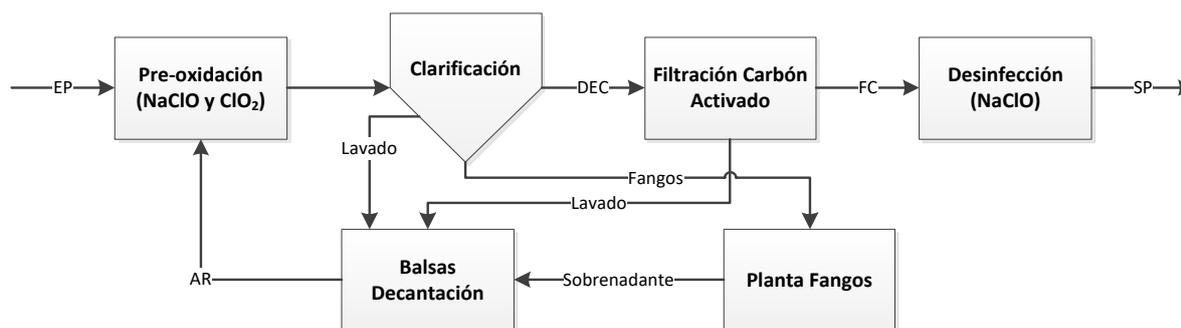


Figura 1. Diagrama de proceso de la ETAP Ter

A lo largo de los años, se han modificado diversas etapas de tratamiento y rehabilitado otras, aunque actualmente se encuentra en una fase inicial un proyecto de remodelación y rehabilitación para hacer frente al envejecimiento de la instalación, lo que posiblemente pueda incluir una nueva etapa de filtración por arena, es decir una filtración física previa a la filtración con carbón activo, dando lugar a un mejor funcionamiento de estos, los cuales son indispensables para asegurar una buena calidad del agua producida en relación tanto a los compuestos orgánicos conocidos que pueda contener el agua a tratar como a los compuestos emergentes.

Los requerimientos legales relacionados con la calidad del producto son cada vez más exigentes, y todos (algunos todavía en borrador, pero de organismos oficiales) van en la línea de aplicar el principio de prevención, reduciendo los diferentes compuestos que se encuentran en el agua de origen, incluidos los compuestos emergentes y, al mismo tiempo, disminuyendo el uso de reactivos químicos y la posible presencia de subproductos del proceso en el agua potabilizada. La voluntad de mejora continua nos hace ser más estrictos que la propia legislación de agua de consumo para alejarse de los valores límite que establece.

En este escenario, a lo largo de estos últimos años, se ha introducido, como parte del proceso, la tecnología de membranas en muchas ETAPs, aumentando la garantía sanitaria del producto. Por lo tanto, desde ATLL se quiere estudiar la posibilidad de implementar algún tratamiento de membranas en el proceso aprovechando el proyecto de remodelación de la planta. Si se tiene en cuenta que la calidad del agua cruda es elevada, salvo en episodios puntuales de sequía por ejemplo, no se contempla el uso de tecnologías como la osmosis inversa (OI), que encarecería el proceso y rebajaría sustancialmente el aprovechamiento del recurso. Sin embargo la UF sí se plantearía como una opción a implementar debido a que se trata de una tecnología muy versátil, con numerosas aplicaciones y ampliamente seleccionada para el tratamiento de agua potable.

Su objetivo sería conseguir una desinfección física, reducir la presencia de compuestos presentes en el agua a tratar y generar los menos subproductos posibles, todo ello con el mínimo uso de reactivos químicos a lo largo del proceso. Podría ser una substituta del proceso de clarificación y de la primera etapa de filtración. Además, la UF presenta una gran ventaja respecto a otro tipo de tratamientos convencionales, y es que la calidad del permeado o producto, se mantiene constante independientemente de la calidad del agua a

tratar, por lo tanto la eliminación de bacterias, virus y otros microorganismos patógenos estaría asegurada sin tener en cuenta la carga en la entrada. En contraposición, hay que valorar un mayor consumo energético y la posibilidad técnica de incluir la tecnología en plantas operativas desde hace años, generando un trabajo específico de reingeniería y construcción.

De este modo, se han desarrollado tres estudios piloto de UF mediante una instalación de Hydranautics (HYDRAcap® MAX Pilot Unit), con una capacidad de producción aproximada de 10 m³/h, en los que se ha tratado consecutivamente agua de tres puntos distintos de tratamiento de la ETAP.

2 Materiales y Métodos

La experimentación se ha llevado a cabo durante más de un año mediante una planta piloto (HYDRAcap® MAX Pilot Unit) de Hydranautics®. La planta piloto consiste en dos módulos presurizados de membranas de fibra hueca HYDRAcap® MAX 60 en una configuración de un solo rack, por lo tanto operando en paralelo. Se trata de membranas de PVDF con un tamaño de poro de 0,08 µm, un diámetro interno de las fibras de 0,6 mm, externo de 1,2 mm y un área superficial de 78 m². El tipo de filtración ha sido frontal, en la que no hay rechazo de concentrado durante la filtración. Cada módulo tiene unas dimensiones de 1,8x0,25 m. La planta piloto se encuentra en un contenedor independiente lo que permite que se pueda transportar con facilidad y poder realizar los pruebas en los diferentes puntos de planta a estudiar.

Los módulos de filtración están totalmente automatizados y sensorizados, de manera que se ha podido hacer un seguimiento exhaustivo de los parámetros de operación a lo largo de los estudios. Durante la operación de filtrado, se han realizado tareas de mantenimiento de las membranas a través de procesos de lavado con aire cada 36 minutos de filtración, con un caudal de 12 a 15 m³/h por modulo y una presión de descarga de entre 0,6 y 0,7 bar. También se han realizado lavados químicos. Uno al día con hipoclorito, uno al día con hidróxido de sodio y cloro, y con ácido clorhídrico dos veces por semana con la planta en operación. Se considera que del total de agua que entra al sistema, un 3% de esta va a rechazo durante los periodos de lavado con aire o lavados químicos.

Los estudios se han realizado en tres puntos distintos de la ETAP Ter de manera consecutiva, inicialmente con agua decantada, seguido de agua cruda sin ningún tipo de tratamiento y finalizando la tercera prueba con agua de recuperación.

2.1 Agua Decantada

La primera fase de la prueba se ha llevado a cabo durante tres meses, en el periodo de Julio a Septiembre de 2017, alimentando la planta piloto con agua clarificada procedente de uno de los decantadores de la ETAP Ter. En este caso, el principal objetivo era asegurar el buen funcionamiento de la instalación con un agua de un punto más avanzado del proceso, por lo tanto con una mejor calidad.

Suponiendo una remodelación de la ETAP, en esta situación no se añadirían los filtros de arena entre las etapas de clarificación y filtración con carbón activo, sino que se introduciría la etapa de UF (Figura 2). Todo y que la UF tendría unos costes energéticos superiores a la filtración con arena, hay diversos estudios que proponen la clarificación como tratamiento previo a la UF optimizando así la operación de esta, reduciendo el ensuciamiento de las membranas, y como consecuencia una menor reducción de la permeabilidad, pudiendo aumentar el tiempo entre los ciclos de lavado.

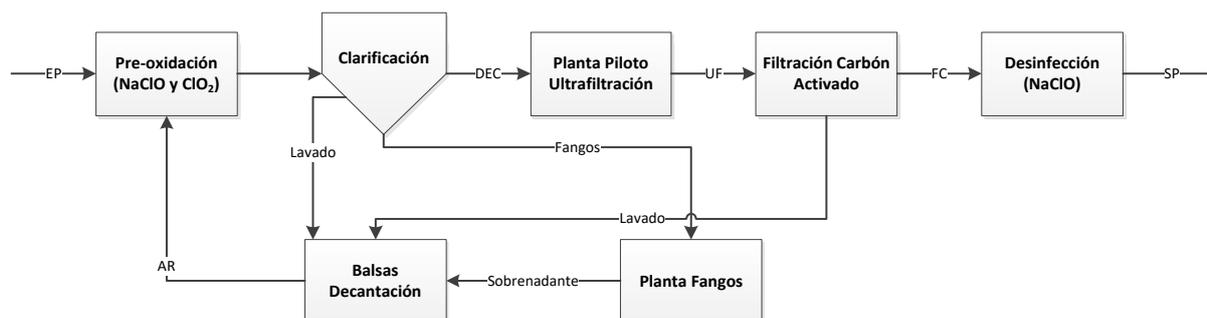


Figura 2. Diagrama de proceso en la prueba con agua decantada (DEC)

La caracterización del agua a tratar en esta prueba se muestra en la Tabla 1 a partir de los parámetros más importantes. Cabe destacar inicialmente una turbidez muy baja debido a que durante la clarificación ya se ha eliminado parte de este indicador de contaminación microbiológica. La presencia de aluminio en el agua decantada es debido al uso del policloruro de aluminio como coagulante durante el proceso de clarificación. La variación en la concentración vendrá marcada tanto por la dosis utilizada del reactivo como por la calidad del agua cruda, causando variaciones en la eficiencia del proceso de coagulación-floculación.

Tabla 1. Caracterización agua decantada (DEC). n=365

Parámetro	Media	Std.	Max.	Min.
Turbidez [NTU]	0,49	0,15	1,49	0,25
pH	7,69	0,09	7,87	7,30
Aluminio [$\mu\text{g/L}$]	152,1	53,3	493,0	56,0
TOC [mg/L]	2,2	0,2	3,2	1,7

2.2 Agua Cruda

La segunda fase ha tenido una duración de seis meses, realizándose entre Octubre de 2017 y Marzo de 2018. En este caso la planta piloto ha tratado directamente agua cruda, es decir el agua que llega del sistema de embalses sin ningún tipo de tratamiento. Con esta opción se simula una posible incorporación de la UF como primera etapa de tratamiento (Figura 3) reduciendo así el uso de reactivos, tanto en la pre-oxidación como en la clarificación. En este caso la etapa de UF trabajaría tanto como filtración física como desinfección física. Por lo tanto se eliminaría la dosificación de los oxidantes al inicio del proceso como el hipoclorito de sodio y el dióxido de cloro, lo que supondría una reducción en la formación de subproductos, especialmente de los subproductos de desinfección, que no se generarían hasta la última etapa del tratamiento. De la misma manera, se eliminaría el uso del policloruro de aluminio, reduciendo la concentración de aluminio en el agua tratada. Finalmente, se podría evaluar la posibilidad de eliminar la línea de tratamiento de fangos, ya que va asociada principalmente al tratamiento de clarificación.

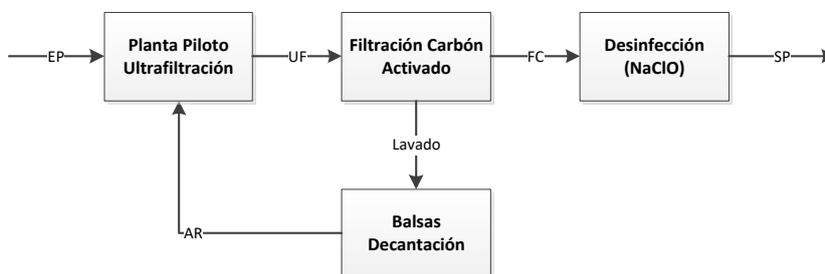


Figura 3. Diagrama de proceso en la prueba con cruda (EP)

La Tabla 2 muestra la caracterización del agua cruda de entrada de la ETAP Ter a través de sus parámetros más destacables. Se trata de un agua con baja conductividad eléctrica y una turbidez ligeramente superior a la del agua decantada pero con valores reducidos por tratarse de un agua cruda. Este hecho es debido a que en el sistema de embalses se produce un fuerte proceso de clarificación natural. La variación de temperatura también es menor y más laminada que en el caso de otras aguas superficiales. Hay que destacar la presencia de manganeso, motivo por el cual se dosifica el dióxido de cloro, muy eficiente en el proceso de oxidación de este.

Tabla 2. Caracterización agua cruda (EP). n=365

Parámetro	Media	Std.	Max.	Min.
Turbidez [NTU]	1,20	0,38	3,65	0,56
Conductividad [$\mu\text{S/cm}$]	401	20	447	314
pH	7,89	0,10	8,30	7,17
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	12,8	2,5	18,2	7,7

TOC [mg/L]	2,7	0,3	3,4	2,2
Manganeso [µg/L]	11,1	16,4	103,0	0,0

2.3 Agua de Recuperación

La ETAP busca el máximo rendimiento hidráulico posible, de manera que el agua de los lavados de filtros de carbón activo a contracorriente, el agua de los espesadores y de las centrífugas de la línea de fangos, y el agua procedente de las purgas de decantadores, se recoge en unas balsas de decantación y posteriormente el sobrenadante es enviado a la cabecera de planta, lo que se conoce como agua de recuperación, de este modo se evita el vertido a cauce público y se cierra el ciclo de la propia planta, aprovechando al máximo el caudal captado. Actualmente, este flujo de recuperación no tiene ningún tipo de tratamiento exceptuando la clarificación en las balsas, se trata de un agua con una calidad similar a la del agua cruda, que puede tener una mayor concentración en la carga microbiológica, pero que generalmente representa menos del 3% del caudal de tratamiento de la ETAP. De este modo, la tercera fase del estudio se está realizando actualmente y consiste en colocar la planta piloto de UF en este flujo (Figura 4) para mejorar la calidad del agua de recuperación que se recircula y es mezclada con el agua cruda, para así asegurar que no se esté produciendo un proceso de concentración de ciertos parámetros en las primeras etapas del tratamiento.

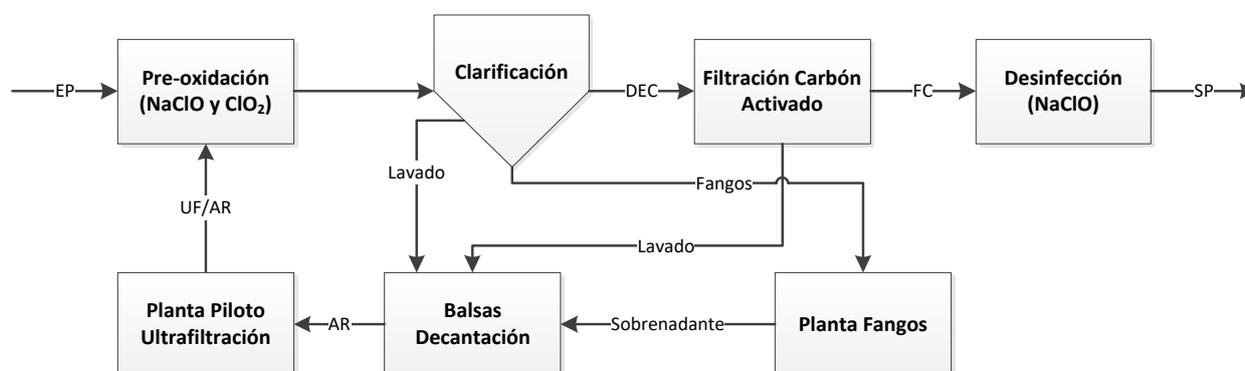


Figura 4. Diagrama de proceso en la prueba con agua de recuperación (AR)

Los parámetros principales de calidad del agua de recuperación se muestran en la Tabla 3, en la cual se muestra una turbidez ligeramente superior a la del agua cruda de igual modo que los valores máximos. Esta agua contiene mayores concentraciones tanto de aluminio como de manganeso que el agua de entrada planta, debido principalmente a la aportación de los sobrenadantes de la planta de fangos.

Tabla 3. Caracterización agua de recuperación (AR). n=365

Parámetro	Media	Std.	Max.	Min.
Turbidez [NTU]	1,50	1,05	7,61	0,48
pH	7,81	0,11	8,29	7,38
Aluminio [µg/L]	282,2	182,4	986,0	52,0
Manganeso [µg/L]	87,7	131,7	804,0	0,0

3 Resultados y Discusión

En este estudio se ha utilizado la turbidez para monitorizar la eficiencia en la separación de las membranas de UF. La turbidez es una medida cualitativa de la cantidad de sólidos en el agua y se mide en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Además se ha medido la materia orgánica como carbono orgánico total (TOC) y se han analizado diversos parámetros bacteriológicos y parasitológicos. Los resultados obtenidos durante las tres fases del estudio se muestran a continuación.

3.1 Estudio en Agua Decantada

Durante este periodo la planta piloto ha estado en marcha durante 1.100 horas produciendo 13.000 m³ de permeado. El flujo de permeado ha sido de entre 80 LMH y 70 LMH.

XII Congreso Internacional de Aedyr –Toledo, España, 23-25 Octubre, 2018

REF: AedyrTOL18-31

En la Figura 5 se muestra la evolución de las turbideces de alimentación (agua decantada) de la planta piloto, el permeado y el agua filtrada por carbón de la ETAP Ter, durante la primera fase del estudio. La turbidez del agua de alimentación después de 39 muestreos ha tenido un valor medio de 0,48 NTU, siendo el punto máximo de 0,70 NTU y el mínimo de 0,30 NTU. El agua producida por la planta piloto de UF ha tenido una turbidez media de 0,11 NTU, con un valor máximo de 0,30 NTU y un valor mínimo de 0,04 NTU. De este modo, la reducción de turbidez ha sido de un $76,7\pm 13,8\%$. Se puede observar como la turbidez obtenida en el permeado es ligeramente inferior a la del agua filtrada por carbón activo de la ETAP Ter.

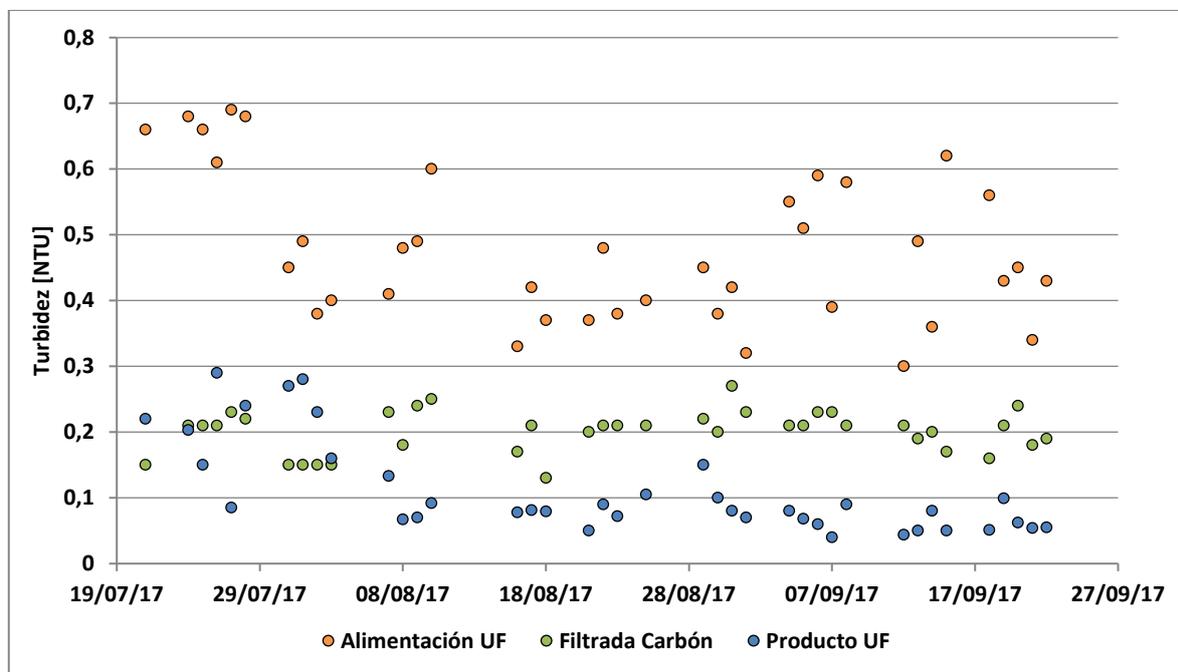


Figura 5. Turbidez de alimentación y permeado de la planta piloto, y del agua filtrada por carbón de la ETAP

En cuanto a su rendimiento como etapa de desinfección física, la UF ha sido un rendimiento efectivo en las ocho tomas de muestra para controlar los parámetros bacteriológicos. Cabe destacar que al tratarse de un agua clarificada, a la que se le ha dosificado previamente hipoclorito de sodio y dióxido de cloro, es una alimentación con una carga microbiológica muy baja como se puede observar en la Tabla 4, donde se muestran los resultados de coliformes totales, *Escherichia coli* y *Clostridium perfringens* como indicadores bacteriológicos. El flujo de permeado analizado ha mostrada ausencia en todos los casos.

Tabla 4. Parámetros microbiológicos (n=8) del agua de alimentación y permeado de la planta piloto de UF

Parámetro [ufc/100ml]	Alimentación				Permeado				% Eliminación
	Media	Std.	Max.	Min.	Media	Std.	Max.	Min.	
Coliformes totales	0,6	1,1	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
<i>E.coli</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
<i>C.perfringens</i>	0,4	0,7	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100

En esta fase del estudio es importante destacar el comportamiento de la planta piloto de UF con un agua con una concentración destacable de aluminio, procedente de la dosificación del policloruro de aluminio como coagulante. Tras seis tomas de muestra, se ha obtenido una concentración de $248,9\pm 73,8$ $\mu\text{g/L}$ en el agua de alimentación y de $69,9\pm 14,9$ $\mu\text{g/L}$ en el producto de la UF, lo que representa un $69,1\pm 13,4\%$ de reducción. Durante el periodo de prueba no se han detectado variaciones en el funcionamiento de la planta piloto debido a un ensuciamiento temprano de las membranas por la presencia de aluminio en el agua a tratar.

3.2 Estudio en Agua Cruda

Durante esta fase del estudio, la planta piloto ha operado 2.700 horas y ha producido 26.000 m³. La planta piloto ha funcionado manteniendo un flujo de permeado de 60 LMH, con una permeabilidad inicial normalizada a 20°C de 300 LMH/bar hasta un valor 130 LMH/bar.

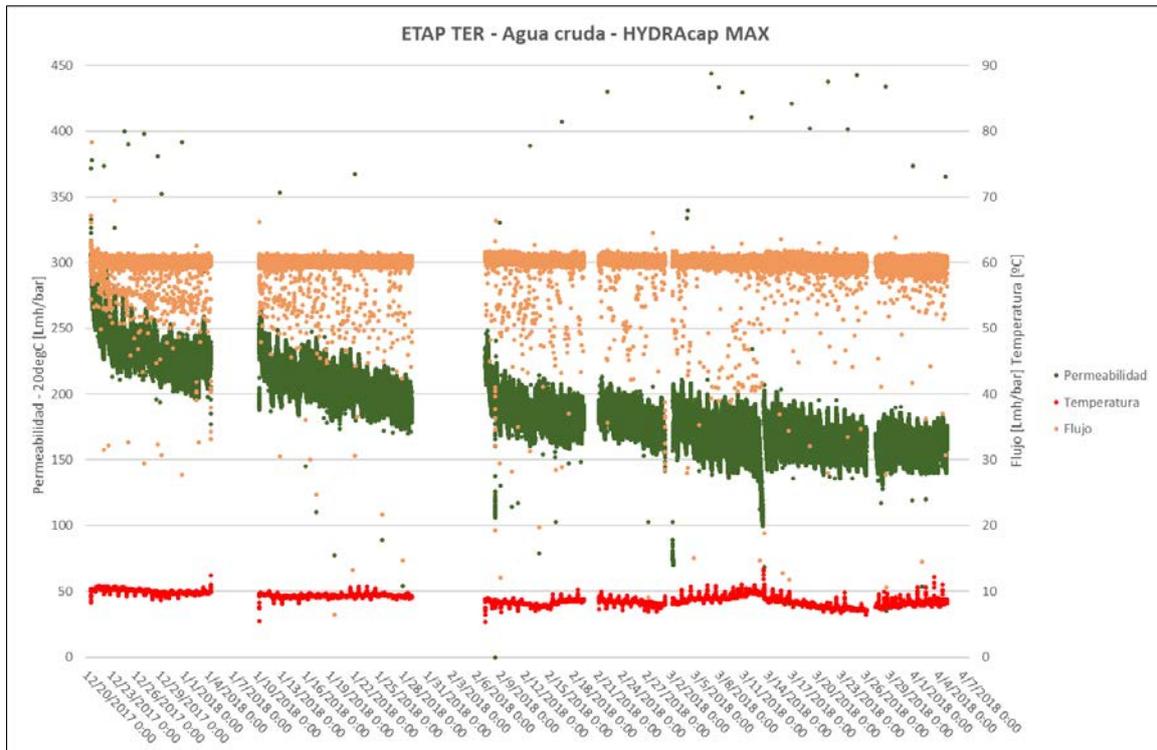


Figura 6. Evolución de la permeabilidad en planta piloto con agua cruda

El agua cruda que ha alimentado la planta piloto durante esta prueba ha mostrado, a partir de los 91 datos disponibles, un valor de turbidez medio de 1,49 NTU, siendo 3,40 NTU el valor máximo y 0,80 NTU el valor mínimo. Por otro lado, la turbidez del flujo de permeado ha tenido un valor medio de 0,13 NTU con un máximo de 0,30 NTU y un mínimo de 0,05 NTU. Esto representa una reducción del 91,1±4,5% respecto al flujo de entrada. En la Figura 7 se muestra la evolución de estos valores en comparación con los datos reales obtenidos en la ETAP Ter de las diferentes etapas de tratamiento.

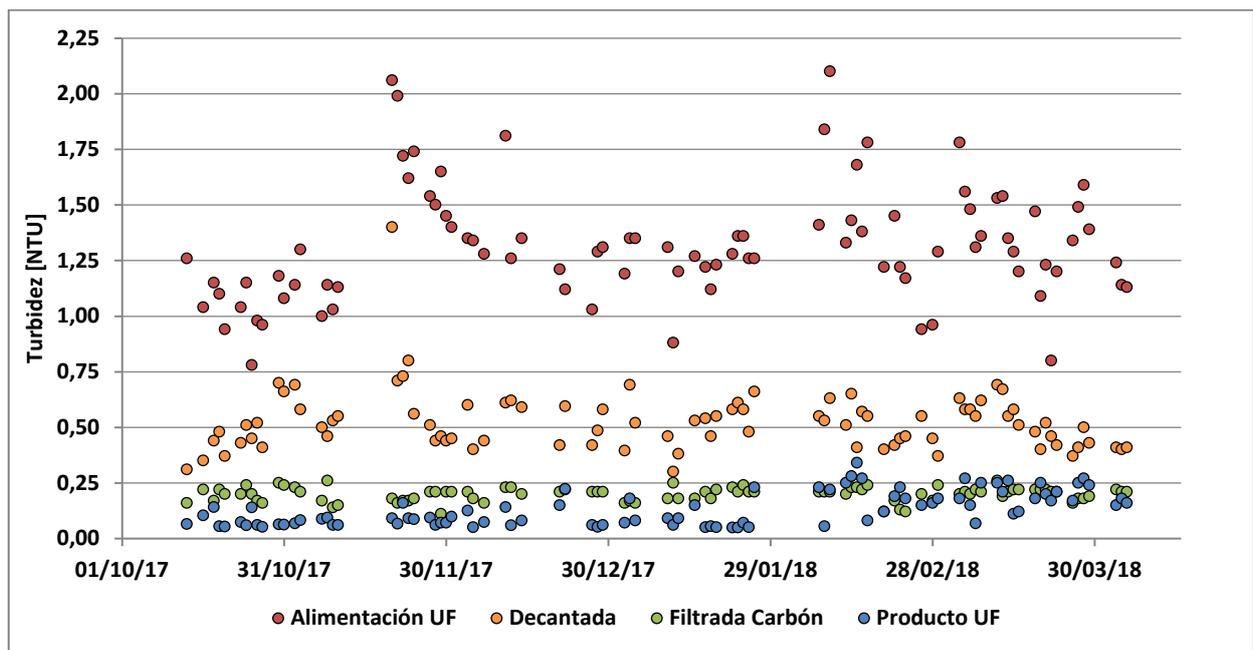


Figura 7. Turbidez de alimentación y permeado de la planta piloto, y del agua decantada y filtrada por carbón de la ETAP

Se puede observar como en este periodo de tiempo, la turbidez media del permeado (0,13 NTU) ha sido inferior a la obtenida con la clarificación (0,46 NTU) y con valores del mismo orden, en algunos casos inferiores, que el agua filtrada por carbón activo.

En cuanto a la materia orgánica, se ha medido en un total de 77 muestras. Los resultados obtenidos en la alimentación y el permeado de la planta piloto, del mismo modo que el agua decantada y filtrada por carbón de la ETAP Ter, se muestran en la Figura 8. Los resultados de la alimentación tienen un valor medio de 2,55 mg/L, siendo el máximo de 2,90 mg/L y el mínimo de 2,20 mg/L. En el caso del permeado, el valor medio es de 2,23 mg/L, la concentración máxima de 2,80 mg/L y la mínima de 1,90 mg/L. De este modo, la reducción obtenida de materia orgánica es de 12,3±4,0%. Por otro lado, el agua decantada presenta un valor medio de TOC de 2,09 mg/L, ligeramente inferior al del agua tratada con la UF.

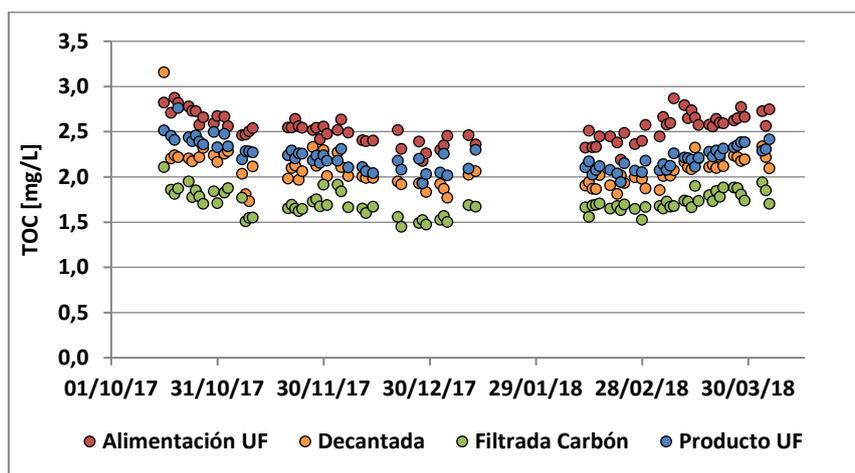


Figura 8. TOC de alimentación y permeado de la planta piloto, y del agua decantada y filtrada por carbón activo de la ETAP

La eliminación de turbidez va asociada a una desinfección física del agua tratada. Se han analizado 17 muestras de cuatro parámetros bacteriológicos indicadores como son los coliformes totales, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* y *Enterococcus faecalis* y 2 dos muestras más de parámetros parasitológicos, como son las quistes de *Giardia* y los ooquistes de *Cryptosporidium*. Habiendo presencia de todos los parámetros microbiológicos analizados en las muestras de alimentación de la planta piloto, los resultados obtenidos en el permeado han sido de ausencia en todos los casos, lo que representa un 100% de eliminación y rendimiento de la desinfección física del proceso con el agua cruda de la ETAP Ter (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros bacteriológicos (n=17) y parasitológicos (n=2) del agua de alimentación y permeado de la planta piloto de UF

Parámetro [ufc/100ml]	Alimentación				Permeado				% Eliminación
	Media	Std.	Max.	Min.	Media	Std.	Max.	Min.	
Coliformes totales	238,4	180,0	727,0	74,9	0,0	0,0	0,0	0,0	100
<i>E.coli</i>	8,4	6,9	22,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
<i>C.perfringens</i>	3,4	2,5	8,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
<i>E.faecalis</i>	3,3	3,1	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
<i>Giardia</i>	2,0	0,6	2,4	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	100
<i>Cryptosporidium</i>	5,9	1,5	6,9	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	100

Finalmente, los metales pesados que se pueden encontrar de manera natural en forma particulada en el agua cruda son el hierro, el manganeso y el aluminio. Las concentraciones de estos metales, obtenidas en 18 muestreos, son en el caso de la alimentación de 13,6±6,5 µg/L de aluminio, 19,1±17,1 µg/L de manganeso y 26,7±9,0 µg/L de hierro. En el permeado de la planta piloto de UF, las concentraciones han sido de 4,4±2,0 µg/L de aluminio, 0,5±0,2 µg/L de manganeso y 3,8±0,5 µg/L de hierro. Comparativamente, la reducción de estos metales es similar a la actual de la ETAP, ya que en las mismas muestras para la salida de planta, los resultados obtenidos son de 0,5±0,2 µg/L de manganeso, 3,5±0,6 µg/L de hierro, y 47,2±14,3

µg/L de aluminio. La mayor concentración de este último viene dada por la dosificación de policloruro de aluminio como coagulante de proceso. Cabe destacar, que la presencia de estos metales en el agua de alimentación puede generar un ensuciamiento más rápido de los módulos de UF.

De este modo, añadiendo la etapa de UF en el inicio del proceso, y por lo tanto substituyendo la clarificación, se obtendría en general una mejor calidad del agua, con una menor turbidez, lo que supondría un beneficio para la siguiente etapa de tratamiento, los filtros de carbón activo, a través de los cuales se filtraría un agua sin sólidos en suspensión, generando un menor ensuciamiento y un mayor rendimiento de estos, aunque el contenido de materia orgánica sería ligeramente superior. Además se realizaría una desinfección física al 100% sin la necesidad de dosificar reactivos oxidantes y desinfectantes hasta el final del proceso, reduciendo así los subproductos. Finalmente, la ausencia de decantadores en el proceso supondría la nula generación de fangos en el tratamiento, pudiendo eliminar o reducir la planta de tratamiento de fangos, quedando únicamente como necesaria para los fangos de las balsas de decantación del agua de lavado de filtros.

Por otro lado, el factor limitante sería el ensuciamiento de las membranas, lo que generaría una reducción del flujo de permeado a largo plazo. Este hecho vendría iniciado por un aumento de la capa gel llegando al ensuciamiento y obstrucción de los poros de las membranas por adsorción de las sustancias presentes en el agua cruda, incrementando la resistencia en la filtración. Para mantener el flujo de permeado se debería incrementar el consumo energético, es decir, los costes, o incrementar la frecuencia de lavados químicos.

3.3 Estudio en Agua de Recuperación

La tercera fase experimental del estudio ha empezado a inicios del mes de Mayo de 2018 y en función de los resultados obtenidos tendrá una duración de entre 3 y 6 meses. Los resultados previos tras 150 horas de operación muestran una reducción de turbidez hasta valores inferiores a 0,15 NTU en el permeado y de ausencia de parámetros microbiológicos analizados. Finalmente, la elevada concentración de aluminio en el agua de recuperación se ve reducida del orden del 45% en el flujo de permeado. Los resultados definitivos de calidad y operación obtenidos durante el periodo completo de estudio serán presentados en el Congreso Internacional de Aedyr en Toledo.

4 Conclusiones

Los resultados del estudio muestran el tratamiento de UF como un proceso a tener en cuenta en la remodelación de la ETAP Ter. De manera general, se trata de un sistema más compacto que los tratamientos convencionales como la clarificación y la filtración con arena, con una aportación de reactivos químicos al producto inferior, a la vez que un consumo de estos reactivos mucho menor, utilizados únicamente para los lavados. En contraposición, hay que tener en cuenta que se trata de un proceso con unos costes de explotación mayores a los actuales, pero que dentro de las posibilidades en cuanto a tecnologías de membrana, es la opción con los consumos energéticos más bajos.

Manteniendo la clarificación como pre-tratamiento para la UF, el tratamiento con membranas substituiría a la posible inclusión de filtros de arena. En este caso, la planta piloto ha operado correctamente y se ha reducido notablemente la turbidez del agua decantada, eliminando gran parte del aluminio residual presente en el agua clarificada. Trabajando con esta configuración se podría ajustar el tratamiento de clarificación para tener un agua óptima para alimentar la UF y así reducir la frecuencia de lavados, tanto químicos como con aire.

Incluyendo la UF como primer tratamiento, se pasaría a un proceso de tratamiento más sencillo, en el que se conseguiría una desinfección física y una reducción de turbidez mayor que únicamente con la clarificación, alimentando los filtros de carbón activo con un agua con menos sólidos en suspensión. Además se eliminaría la generación de fangos en el tratamiento. Por otro lado, la principal reducción de materia orgánica disuelta recaería en los filtros de carbón activo, pudiendo generar una mayor colmatación de estos. Finalmente, se reduciría el consumo de reactivos, y se suprimiría la adición de estos directamente al agua, aunque el consumo energético general de la planta se vería incrementado.

Sería necesaria la realización de un estudio específico para los costes, que permitiese tomar una decisión en cuanto al proceso de remodelación de la ETAP Ter, quedando resuelta en este estudio la parte operativa y de calidad del producto.

5 Bibliografía

Arnal J.M., Garcia-Fayos B., Verdu G., Lora J. (2008). Ultrafiltration as an alternative membrane technology to obtain safe drinking water from surface water: 10 years of experience on the scope of the AQUAPOT project. *Desalination* 248, pp.34-41

Gao W., Liang H., Ma J., Chen Z., Han Z., Li G. (2011). Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review. *Desalination* 272, pp.1-8

Konieczny K., Sakol D., Plonka J., Rajca M., Bodzek M. (2009). Coagulation-ultrafiltration system for river water treatment. *Desalination* 240, pp.151-159

Lowe J., Hossain Md.M. (2008). Application of ultrafiltration membranes for removal of humic acid from drinking water. *Desalination* 218, pp.343-354

Wang X., Ma B., Bai Y., Lan H., Liu H., Qu J. (2017). Comparison of the effects of aluminium and iron (III) salts on ultrafiltration membrane biofouling in drinking water treatment. *Journal of Environmental Sciences* (Article in Press)