

# Producción de Agua de Alta Pureza: Electrodesionización en Continuo (CEDI)

Joan Sanz (\*), Leopoldo Guerrero (\*), Manel Roca (\*\*).

VEOLIA Water Systems Ibérica. (\*) Dirección Técnica. (\*\*) División Agua de Alta Pureza.

Edificio Augusta Park, Avda. Vía Augusta, 3-11. 08174 Sant Cugat del Vallès. Telf. : 935110100, Fax: 935110109.

E-mail: [joan.sanz@veoliawater.com](mailto:joan.sanz@veoliawater.com) , [manel.roca@veoliawater.com](mailto:manel.roca@veoliawater.com)

## Resumen

La electrodesionización en continuo (CEDI) es un proceso que emplea una combinación de membranas de intercambio iónico, resinas de intercambio iónico y un campo eléctrico de corriente continua para desionizar el agua. Los diseños estándar para obtener agua purificada, agua para inyectables y agua de alta pureza emplean una combinación de ósmosis inversa y electrodesionización en continuo. Con este diseño el proceso CEDI puede producir agua con concentraciones de iones específicos cercanas o inferiores a los límites de detección. El proceso CEDI está actualmente ampliamente aceptado para la producción de agua de alta pureza en la industria farmacéutica, microelectrónica y producción de energía.

## Palabras clave

Electrodesionización, CEDI, agua de alta pureza, agua purificada, agua para inyectables.

## Abstract

Continuous electrodeionization (CEDI) is a process that uses a combination of ion-exchange membranes, ion-exchange resins, and a DC electric field to deionize water. Standard designs to obtain purified water, water for injection and ultrapure water uses a combination of reverse osmosis and continuous electrodeionization. With this design a CEDI process can produce water with concentration of specific ions near or below detection limits. CEDI is currently a widely accepted process for high-purity water in the pharmaceutical, microelectronics and power industries.

## Keywords

Electrodeionization, CEDI, ultrapure water, purified water, water for injection.

## 1. Introducción

La necesidad de producción de agua de alta pureza para uso en la industria farmacéutica (agua purificada y agua para inyectables), veterinaria, cosmética, biotecnología, industria microelectrónica y generación y distribución de vapor puro en calderas de alta presión en el sector de la energía, ha propiciado el desarrollo y avance de diferentes tecnologías de tratamiento del agua dirigidas a la eliminación de todas las impurezas presentes en el agua. En el campo de la desionización después de la aplicación en primer lugar del proceso de intercambio iónico con resinas de intercambio iónico y posteriormente la aparición de los procesos de membrana basados en ósmosis inversa y electrodiálisis reversible [1], la electrodesionización en continuo (continuous deionization CEDI, en

inglés) representó un cambio radical en el diseño de instalaciones para la obtención del agua de alta pureza [2].

Aunque la electrodesionización ya fue descrita por Kollsman en 1957, no es hasta 1987 que se introduce en los procesos de producción de agua de alta pureza de la industria farmacéutica, microelectrónica y producción de energía en calderas de alta presión [2].

Al igual que los procesos de ósmosis inversa sustituyen los procesos de intercambio iónico basados en las cadenas de desmineralización con columnas catión y anión, la electrodesionización sustituye el proceso de intercambio iónico basado en los lechos mezclados de resina catiónica y aniónica destinados a obtener la máxima calidad de pureza del agua. En ambos casos las consideraciones de prevención de riesgos en la manipulación de los regenerantes químicos y del impacto ambiental por los vertidos de la regeneración han sido unos motivos motor de la sustitución de las tecnologías de intercambio iónico.

Durante los últimos diez años el proceso de electrodesionización en continuo se ha desarrollado con objeto de mejorar las prestaciones de los equipos en la producción de agua de alta pureza, proceso de fabricación de los mismos, reducción de costes en materiales y mantenimiento, reducción del espacio requerido, sanitización con agua a 80°C y simplificación del diseño [3-6].

## **2. Descripción del proceso de Electrodesionización en Continuo (CEDI)**

La electrodesionización en continuo (CEDI) es un proceso continuo de producción de agua de alta pureza. En este proceso intervienen una pequeña cantidad de resinas de intercambio iónico, membranas semipermeables aniónicas y catiónicas alternadas y una corriente eléctrica continua entre dos electrodos (cátodo y ánodo). El agua procedente habitualmente de un sistema de ósmosis inversa, atraviesa el módulo donde debido al potencial eléctrico aplicado a los electrodos se provoca la migración de los iones, produciéndose la desionización y desviándose así los iones al compartimiento del concentrado.

El paso de los cationes y aniones está limitado por las membranas catiónicas y aniónicas. De esta forma el agua es desionizada en las celdas del diluido ó producto y se concentran los iones en las celdas del concentrado. Las concentraciones de iones en el agua son bajas en la parte inferior del compartimiento del diluido ó producto , por lo que el agua es ionizada en las zonas de alto voltaje y los protones e iones hidroxilo que se forman regeneran las resinas catiónicas y aniónicas, respectivamente, haciendo que las resinas regeneradas *in situ* puedan continuar desionizando el agua [7].

En los primeros equipos de desionización en continuo las celdas de diluido ó producto y de concentrado contenían resinas catiónicas y aniónicas mezcladas al uso de los lechos mixtos de intercambio iónico (figura 1).

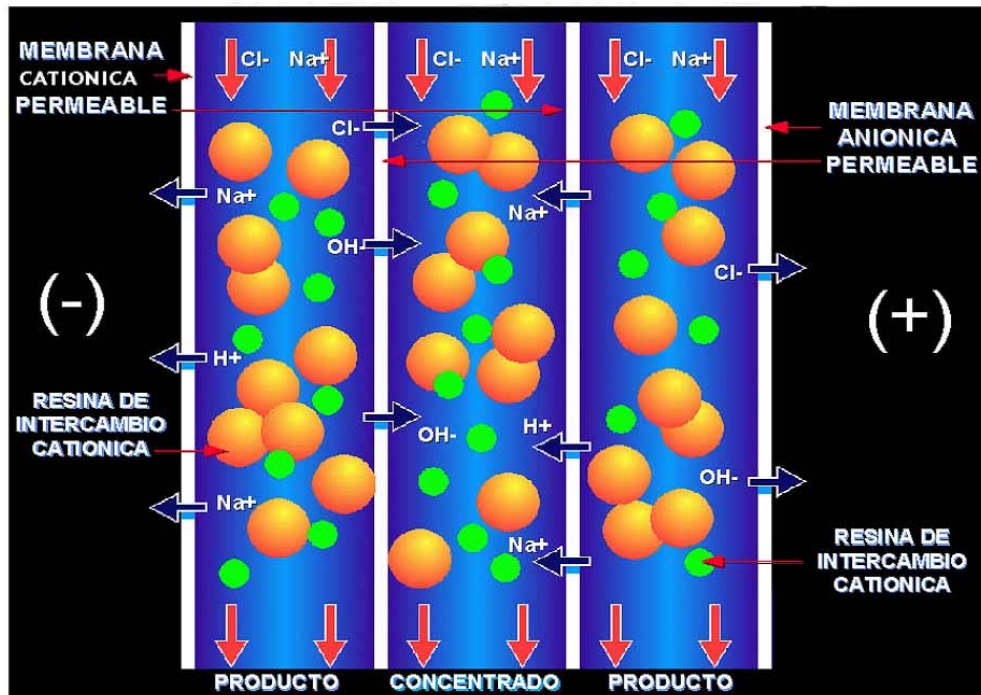


Figura 1. Diseño básico de la electrodesionización en continuo

La migración de los cationes y aniones en los compartimientos de diluido y concentrado se muestran en detalle en las figuras 2 y 3.

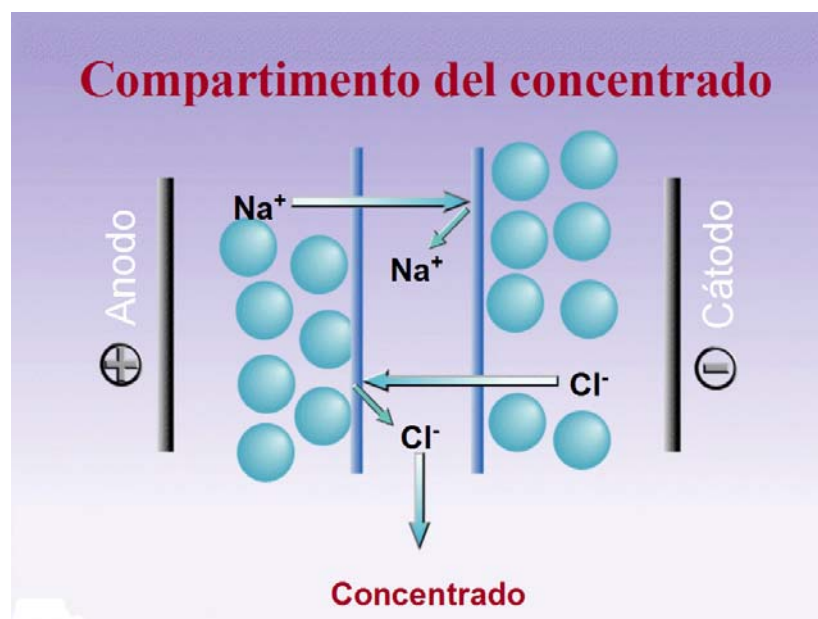


Figura 2. Migración de los iones en el concentrado



Figura 3. Migración de los iones en el diluido

La configuración de los módulos del tipo plato y marco incluyen en la actualidad después de nuevos desarrollos de los módulos CEDI, resinas de intercambio iónico catiónicas y aniónicas separadas en las celdas del diluido ó producto (foto 1) [4].

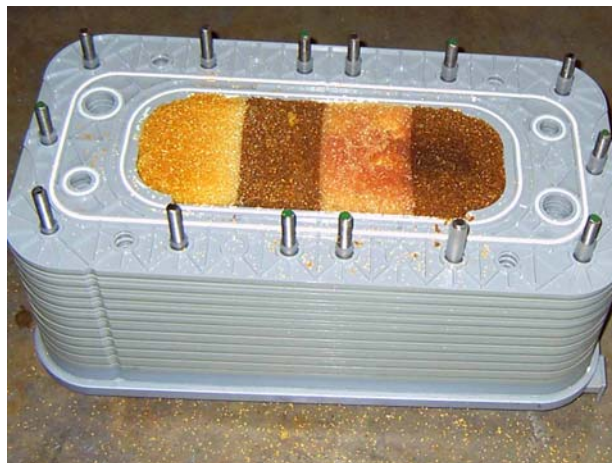


Foto 1 . Vista de un módulo de CEDI donde se aprecia la resina aniónica y catiónica separada

En los sistemas de electrodesionización en continuo los módulos de la configuración plato y marco pueden instalar, dependiendo de la aplicación y el caudal requerido, individualmente o agrupados en bastidores como se muestran en la foto 2.



Foto 2 . Vista de un sistema modular de electrodesionización en continuo

La configuración habitual de una planta de electrodesionización en continuo incluye previamente la filtración, descalcificación y paso a través de una ósmosis inversa (foto 3).



Foto 3 . Vista de un sistema de producción de agua purificada basado en ósmosis inversa y electrodesionización en continuo (producción 24 m<sup>3</sup>/día)

La calidad obtenida en los sistemas de electrodesionización en continuo se adapta a diferentes especificaciones, obteniéndose resistividades del agua producida entre 1 y 18 M $\Omega$ -cm. En la tabla 1 se muestran las prestaciones que se obtienen en sistemas de este tipo [4].



Tabla 1. Análisis de agua obtenida en el sistema combinado de ósmosis inversa (OI) y electrodesionización en continuo (CEDI).

Componente	Salida OI	Salida CEDI	Retención en CDI %
Aniones determinados por IC ( $\mu\text{g/L}$ )			
Cloruro	750	<0,02	>99,99
Nitrato	58	<0,02	>99,96
Fosfato	27	<0,02	>99,92
Sulfato	210	<0,05	>99,97
Cationes determinados por IC ( $\mu\text{g/L}$ )			
Sodio	1100	0,24	>99,97
Amonio	7	<0,05	>99,28
Potasio	26	<0,02	>99,92
Calcio	6	<0,02	>99,66
Trazas de metales determinados por ICP-MS ( $\mu\text{g/L}$ )			
Aluminio	0,22	<0,003	>98,63
Boro	13	<0,05	>99,61
Litio	0,05	<0,002	>96,00
Manganeso	0,03	<0,002	>93,33
Potasio	23	<0,1	>99,56
Rubidio	0,04	<0,001	>97,50
Sílice	110	<0,5	>99,54
Sodio	1300	0,26	>99,98
Zinc	0,09	<0,005	>94,44

Los nuevos desarrollos aparecidos recientemente proponen junto a la configuración plato y marco, la aplicación de la configuración cilíndrica [5] y enrollamiento en espiral similar al empleado en ósmosis inversa [6]. En este último caso el agua de alimentación debe proceder imperativamente de un sistema de ósmosis inversa previo con una conductividad inferior a  $40 \mu\text{S/cm}$  (tabla 2).

Tabla 2. Especificaciones para el agua de alimentación de un sistema CEDI configuración enrollamiento en espiral

Conductividad (incluido $\text{CO}_2$ ) ( $\mu\text{S/cm}$ )	<40
Pretratamiento	Permeado de ósmosis inversa
Temperatura $^{\circ}\text{C}$	5 - 45
Presión de entrada (bar)	1,4 - 5
Cloro total ( $\text{Cl}_2$ )	<0,02 mg/L
Hierro (Fe)	<0,01 mg/L
Manganeso (Mn)	<0,01 mg/L
Sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ )	<0,01 mg/L
PH	4 - 11
Dureza total ( $\text{CaCO}_3$ )	< 1,0 mg/L
Carbono orgánico total (TOC como C)	<0,5 mg/L
Sílice $\text{SiO}_2$	< 1,0 mg/L

### 3. Pretratamiento. Sistema completo de producción de agua de alta pureza

El agua de alimentación a un sistema de producción de agua de alta pureza contiene diferentes concentraciones de compuestos y contaminantes a eliminar: sales solubles, partículas, compuestos orgánicos, sales incrustantes, óxidos de hierro y manganeso, coloides, microorganismos y pirógenos. En función de cada tipo de agua de alta pureza y su destino, se especifican diferentes concentraciones máximas para los constituyentes críticos [8].

De forma general los procesos empleados antes de la electrodesionización en continuo incluyen el pretratamiento previo al proceso de ósmosis inversa y el posterior acondicionamiento del permeado antes de su entrada en el proceso CEDI. La selección del pretratamiento a la ósmosis inversa plantea los mismos esquemas de selección de procesos de tratamiento que en los sistemas de ósmosis inversa sin CEDI posterior y en general viene regida por la calidad del agua de aporte. En función de la calidad del agua de aporte al pretratamiento y las especificaciones exigidas al agua de alta pureza, el proceso de ósmosis inversa se plantea en una o dos etapas. Debido a la sensibilidad de la electrodesionización a la dureza del agua (ver tabla 2), en los sistemas de ósmosis de un solo paso se considera de forma complementaria la reducción de la dureza mediante intercambio iónico en ciclo sodio.

## 4. Aplicaciones

### 4.1 Industria Farmacéutica

El agua es el elemento más empleado en esta industria, no siendo sólo una materia prima del proceso productivo sino que además es usado para procesos de limpieza y enjuague, estando en contacto continuo con una gran variedad de productos y equipos farmacéuticos y siendo un aspecto crítico [9]. La calidad del agua en la industria farmacéutica está regulada por las diferentes Farmacopeas y en concreto por la Farmacopea Americana (USP) y la Farmacopea Europea (Ph Eur). La Farmacopea Americana define dos calidades de agua: agua purificada (PW) y agua para inyectables (WFI) (tabla 3). La Farmacopea Europea define tres calidades de agua: agua purificada, agua para inyectables y agua altamente purificada (tabla 4).

Tabla 3. Especificaciones Farmacopea Americana USP28-NF23

	Agua Purificada PW	Agua para Inyectables WFI
Conductividad	<1,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C	<1,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C
Bacterias	<100 ufc/ml	<10 ufc/100 ml
Carbono orgánico total TOC	<500 $\mu\text{g C}/\text{l}$	<500 $\mu\text{g C}/\text{l}$
Endotoxinas por LAL	No aplicable	<0,25 EU/ml

Tabla 4. Especificaciones Farmacopea Europea Ph Eur

	Agua Purificada PW	Agua para Inyectables WFI	Agua Altamente Purificada
Conductividad	<4,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C	<1,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C	<1,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C
Bacterias	<100 ufc/ml	<10 ufc/100 ml	<10 ufc/100 ml
Carbono orgánico total TOC	<500 $\mu\text{g C}/\text{l}$	<500 $\mu\text{g C}/\text{l}$	<500 $\mu\text{g C}/\text{l}$
Endotoxinas por LAL	No aplicable	<0,25 EU/ml	<0,25 EU/ml

Los sistemas más avanzados (sistema ORION<sup>®</sup>, foto 4) combinan la tecnología de ósmosis inversa y electrodesionización en continuo en sistemas sanitizables con agua caliente (80°C) de acuerdo con los estándares de la Farmacopea Americana, Europea y FDA. De la misma forma estos sistemas cumplen con las especificaciones de calidad fijadas al agua de alta pureza empleada en la veterinaria y cosmética.



Foto 4. Sistema ORION<sup>®</sup> de producción de agua purificada combinando ósmosis inversa y electrodesionización en continuo, sanitizable con agua caliente (producción 134 m<sup>3</sup>/día)

## 4.2 Industria de la Energía

El tratamiento de agua para la operación de calderas de alta presión y generación de vapor para producción de energía eléctrica implica el diseño de plantas con alta disponibilidad, fiabilidad y calidad química del agua producida. El diseño convencional se basa en la aplicación de cadenas de intercambio iónico con columnas catiónicas y aniónicas seguidas de lechos mixtos para alcanzar un valores de conductividad inferior a 0,10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y concentración de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) inferior a 0,10  $\mu\text{g}/\text{l}$ .

La introducción de diseños basados en la combinación de la ósmosis inversa y electrodesionización en continuo ha permitido respecto al diseño convencional mejoras en la reducción de costes de operación, eliminación de la manipulación de productos corrosivos, reducción del impacto ambiental al eliminar los vertidos procedentes de la regeneración de las resinas catiónicas y aniónicas y la consecución de una garantía de mayor estabilidad de la calidad del agua producida [10].

La figura 4 muestra el diagrama de flujo de la planta de producción de agua desionizada para alimentación a calderas de alta presión y torres de refrigeración instalada en la planta de cogeneración en ciclo combinado de 95,4 MW de Iberdrola Soluciones Energéticas/EnergyWorks para GE Plastics en Cartagena [11]. Esta planta está diseñada para una capacidad de producción de 2850 m<sup>3</sup>/día de agua de conductividad inferior a 0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El pretratamiento consiste en un sistema de clarificación en base al proceso Actiflo<sup>®</sup> y filtración multimedia tricapa. La línea de tratamiento es un sistema Sirion<sup>®</sup> con dos pasos de ósmosis inversa y una capacidad de producción de 3000 m<sup>3</sup>/día, mientras el sistema de electrodesionización en continuo está formado por cinco grupos de 8 módulos cada uno operando a una conversión del 95%. La tabla 5 muestra la calidad de alimentación al pretratamiento del sistema y la del agua desionizada obtenida para la alimentación a caldera de alta presión.



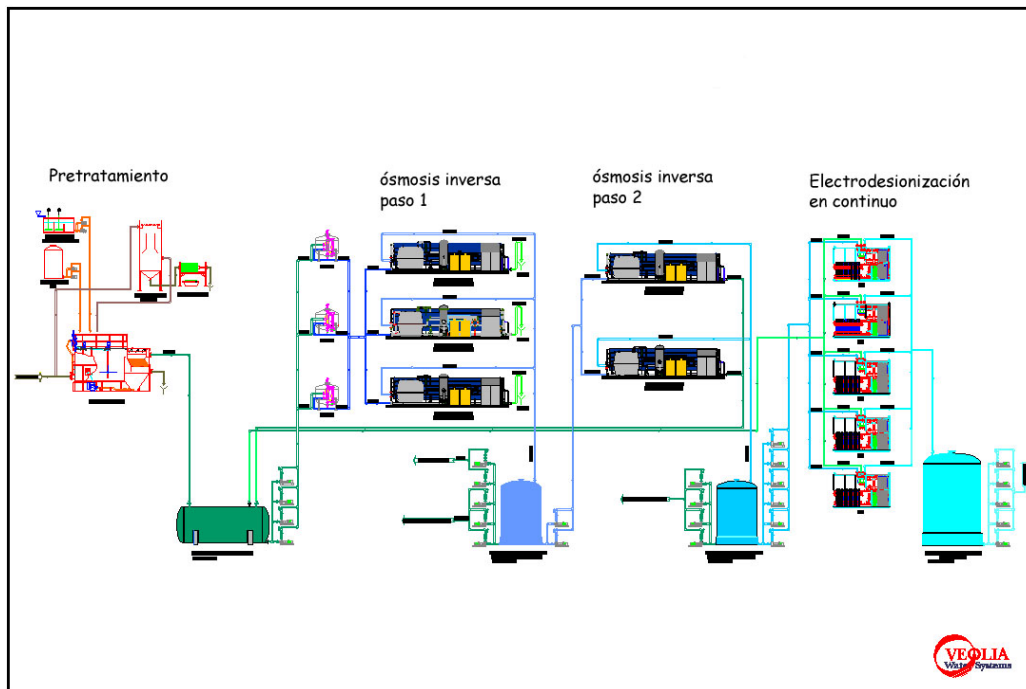


Figura 4. Diagrama de flujo de producción de agua de alta pureza para alimentación a calderas de alta presión

La foto 5 muestra un detalle de la electrodesionización en continuo del sistema Sirion®.



Foto 5. Equipos modulares de electrodesionización en continuo para producción de agua desionizada para calderas de alta presión (producción 2850 m<sup>3</sup>/día)

Tabla 5. Calidad del agua de alimentación al pretratamiento y el agua tratada a la salida de la electrodesionización en continuo

	Alimentación al pretratamiento	Agua desionizada
Conductividad	1188-2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C
Sílice	3 mg/l $\text{SiO}_2$	<10 $\mu\text{g}/\text{l}$ $\text{SiO}_2$
Sodio + potasio		<10 $\mu\text{g}/\text{l}$
Hierro total		<10 $\mu\text{g}/\text{l}$
Carbono orgánico total TOC		<20 $\mu\text{g}/\text{l}$
pH	8,2	
Temperatura	17-28°C	
Cloruros	142-256 mg/l	<3 $\mu\text{g}/\text{l}$
Sulfatos	363-700 mg/l	<3 $\mu\text{g}/\text{l}$
Calcio	130-180 mg/l	
Magnesio	54-80 mg/l	

### 4.3 Microelectrónica

La producción de semiconductores en la industria microelectrónica requiere el agua de alta pureza de mayor calidad. Las especificaciones de calidad no solo exigen valores de resistividad que alcanzan 18  $\text{M}\Omega\text{-cm}$ , sino que precisan la reducción próxima al límite de detección del carbono orgánico disuelto, sílice, boro, bacterias y del recuento de partículas de tamaño superior a 0,05  $\mu\text{m}$  [1,12]. En España, la aplicación de los sistemas combinados de ósmosis inversa y electrodesionización en continuo se remontan a 1990, siendo la primera aplicación del proceso CEDI a escala industrial. La tabla 6 muestra la calidad típica obtenida en la aplicación de aguas de lavado en microelectrónica [13].

Tabla 6. Calidad típica obtenida a la salida de la electrodesionización en continuo en la aplicación de lavado en microelectrónica

Soluto	Alimentación a CEDI	Producto CEDI ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )
Bario ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,002	<0,002
Boro ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,31	0,05
Calcio ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,5	<0,3
Magnesio ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,39	0,051
Manganeso ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,012	<0,004
Potasio ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	11	<0,5
Rubidio ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,014	<0,002
Sodio ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	64	0,69
Estaño ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,016	0,018
Cloruro ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<0,02	0,05
Sulfato ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,08	<0,05
Sílice ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	3,86	1,27

## 5. Conclusiones

Los sistemas de electrodesionización en continuo forman parte desde hace unos quince años de los diseños de producción de agua de alta pureza para los sectores de la industria farmacéutica y microelectrónica. En el sector de producción de vapor para generar energía eléctrica está ganando aceptación sustituyendo a los diseños convencionales basados exclusivamente en el intercambio iónico. Los nuevos desarrollos en el campo de la electrodesionización en continuo se han centrado en la reducción de los costes asociada a nuevos diseños de los módulos disminuyendo el espacio ocupado y la ingeniería precisa en las instalaciones industriales. En el sector farmacéutico los nuevos diseños permiten la sanitización periódica del sistema de electrodesionización en continuo con agua caliente a 80°C, manteniendo de esta forma un mejor control de la población bacteriana y sus metabolitos.

## 6. Bibliografía

- [1] T. H. Meltzer (1993). High-Purity water preparation for the semiconductor, pharmaceutical, and power industries. Tall Oaks Publishing, Inc. 833 pp.
- [2] G. C. Ganzi, Y. Egozy, A.J. Giuffrida (1987). High purity water by electrodeionization performance of the Ionpure continuous deionization system. *Ultrapure Water*. April, 43-50.
- [3] C. Griffin (1991). Advancements in the use of continuous deionization in the production of high-purity water. *Ultrapure Water*. November, 52-59.
- [4] J. D. Gifford, D. Atnoor (2000). An innovative approach to continuous electrodeionization module and systems design for power applications. Proceedings of the International Water Conference, Pittsburg, Pa, October 2000.
- [5] L. Shiang (2003). Evolution in design of CEDI systems. *Ultrapure Water*. October, 13-17.
- [6] A. Dey, J. Tate (2005). A review of spiral-wound electrodeionization technology. *Ultrapure Water*, July/August, 20-29.
- [7] American Water Works Association (1998). Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. Capítulo 18, Reactores de membranas de intercambio iónico. McGraw-Hill. 837 pp.
- [8] B. S. Parekh (1991). Get your process water to come clean. *Chemical Engineering*, January.
- [9] P. L. Parise, B. S. Parekh, G. Waddington (1990). The use of ionpure continuous deionization for the production of pharmaceutical and semiconductor grades of water. November, 14-28.
- [10] J. Kasper, P. Parise, G. Korbas, J. Wood (1991). Continuous deionization for boiler water makeup production: A comparison with current technologies. *Ultrapure Water*, October, 29-42.
- [11] Veolia Water Systems (2002). Planta de tratamiento de agua. En: Planta de cogeneración en ciclo combinado de 95,4 MW, de Iberdrola Soluciones Energéticas/EnergyWorks para GE Plastics en Cartagena, Murcia. Infopower, Octubre 2002.
- [12] B. S. Parekh (1988). Reverse osmosis technology, applications for high-purity-water production. Marcel Dekker, Inc, New York and Basel. 516pp.
- [13] G. C. Ganzi, A. D. Jha, F. DiMascio, J.H. Wood (1997). Theory and practice of continuous electrodeionization. *Ultrapure Water*, July/August, 64-68.