

LIBRERÍA DINÁMICA DE PLANTAS DE DESALINIZACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA

Luis Gómez Palacín, Fernando Tadeo Rico, César de Prada Moraga
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Facultad de Ciencias,
Universidad de Valladolid, 47002 Valladolid, España
palacin@cta.uva.es

Resumen

En este documento se describe una librería dinámica para el diseño y simulación de plantas de desalinización de agua mediante ósmosis inversa. La librería puede ser utilizada para el diseño del proceso, optimización energética, optimización del tamaño de los diferentes elementos (membranas, depósitos, bombas, etc.), diseño de las diferentes estrategias de control, etc. Los problemas típicos de simulación (como flujos inversos, redes de tuberías, vaciado de tanques, etc.) han sido estudiados y resueltos. Además, la librería ha sido desarrollada teniendo en cuenta la reconfigurabilidad, facilidad de uso, robustez, etc. El desarrollo de la librería ha incluido el planteamiento de modelos matemáticos adecuados para las membranas de ósmosis inversa. Finalmente, se presentan algunas de las simulaciones realizadas con esta librería.

Palabras Clave: librería de simulación, simulación dinámica, modelado, plantas de desalinización, ósmosis inversa, membranas.

1 INTRODUCCIÓN

En la lucha por evitar la escasez de agua y la desertificación, cada vez son más utilizadas las plantas de desalinización mediante ósmosis inversa. Pueden tratar agua salobre y marina, son plantas sencillas, pueden tener tamaños muy pequeños, son fáciles de operar, tienen una relación coste – producción baja [8], etc. Las plantas de ósmosis inversa tienen por tanto una gran cantidad de ventajas, que motivan su uso. Sin embargo, para poder trabajar de una manera eficiente, y con un periodo de vida largo de los diferentes elementos, es fundamental, primero, operarios cualificados, y segundo, un eficiente sistema de control.

Trabajar con un buen sistema de control es importante por dos motivos. Primero, por las necesidades del tratamiento del agua y el mantenimiento de los equipos (principalmente de la membrana): Si no se trabaja adecuadamente se

producirá la proliferación de microorganismos (situación que ha de evitarse en todo caso, debido a que se está trabajando con agua que va a ser consumida por un cierto número de personas), así como la prematura destrucción de la membrana. El segundo motivo es el alto consumo de energía por parte de la planta. Para poder trabajar con un rendimiento aceptable, es necesario trabajar en el punto óptimo de trabajo (que satisfaga la producción de agua potable requerida).

Por todo ello, es necesario un sistema de control adecuado. Los sistemas de control avanzados, están basados en modelos del sistema, y requieren la disponibilidad de herramientas de simulación dinámica [3] y [5]. Sin embargo, en las plantas de ósmosis inversa existe una escasez de modelos dinámicos, lo que limita considerablemente el estudio del control avanzado en estas plantas [4] y [6].

De hecho, conceptos fundamentales como la reducción de costes y la optimización de la energía, han sido tenidos en cuenta casi exclusivamente desde el punto de vista de la mejora de los elementos básicos de la planta (bombas y membranas) [1], [7] y [8]. En el futuro, el avance tecnológico en los componentes de la planta deberá ser acompañado por sofisticados sistemas de diseño. Así, herramientas de simulación dinámica, como la presentada en este documento, serán necesarias.

2 PLANTAS DE ÓSMOSIS INVERSA

El proceso de ósmosis inversa consiste básicamente en hacer pasar a través de una membrana parte del agua que se alimenta a la planta. Esta agua de alimentación tiene una alta concentración en sal (muy superior a la requerida para el consumo humano), y puede ser de origen salobre o marino. El agua que pasa a través de la membrana es prácticamente pura, y recibe el nombre de permeado. Por otro lado, la parte de la corriente de alimentación que no ha pasado a través de la membrana se concentra en sal, y recibe el nombre de concentrado o rechazo.

Para hacer pasar el agua a través de la membrana se requiere una presión elevada (capaz de superar la presión osmótica). Esta presión es suministrada con una bomba de alta presión a la entrada de la membrana, variando mucho de unas plantas a otras, siendo del orden de 40 bares para agua salobre, y 80 bares para agua marina: Ver [8] para tener más detalles del proceso.

2.1 PRETRATAMIENTO

La corriente de alimentación antes de ser llevada a la membrana requiere una etapa de pretratamiento. En esta etapa de pretratamiento se realiza un filtrado y una adición de compuestos químicos.

El filtrado se realiza para la eliminación de las partículas sólidas que puedan obstruir la membrana. Para realizar este filtrado se hace pasar la corriente de alimentación por un filtro de arena (que elimina las partículas de mayor tamaño) y por filtros de cartucho (que eliminan las partículas más pequeñas).

La adición de compuestos químicos se realiza para la eliminación de microorganismos (que pueden anidar y procrear en la membrana), eliminación de las sustancias que pueden precipitar en la membrana (obstruyéndola) y ajuste del pH (debido a que pH altos y bajos deterioran muy rápidamente la membrana).

2.2 POSTRATAMIENTO

Antes de poder ser consumida, la corriente de permeado debe ser tratada. Se añade cloro para eliminar los posibles microorganismos, y se ajusta mediante dosificación de productos químicos el pH. Finalmente, es necesario ajustar la concentración de sal en el permeado, ya que la concentración de sal con la que sale el permeado de la membrana es inferior a la concentración requerida para el consumo humano. Este ajuste de la concentración de sal puede realizarse directamente añadiendo sal, o lo que resulta más interesante, mezclando la corriente de permeado con una parte del agua de alimentación (ya tratada, filtrada y a la que se han añadido los compuestos químicos requeridos). De esta segunda manera se obtiene una mayor cantidad de agua para ser consumida. Además, la porción de agua de alimentación que es mezclada con el permeado, no pasa a través de la bomba de alta presión (que es donde se produce el mayor consumo energético) de manera que se consigue un importante ahorro energético.

La producción de agua potable en la planta de ósmosis inversa es continua y constante a lo largo del día. Sin embargo, la demanda de agua potable no. Y de hecho varía de una manera muy importante a lo

largo del día. Durante la noche el consumo de agua es mínimo. Por la mañana se obtiene un pico de demanda. Vuelve a decaer al medio día, y aumenta de nuevo en las últimas horas de la tarde. En la figura 1 se muestra cualitativamente una posible curva de demanda de agua, que es bastante cíclica, repitiéndose cada 24 horas.

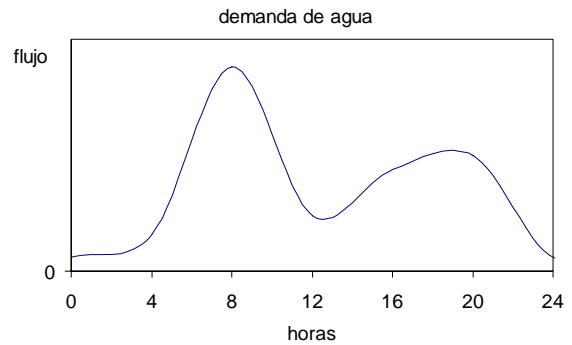


Figura 1: Demanda de agua a lo largo de un día

Debido a que la demanda de agua varía a lo largo del día, pero la producción es constante, es necesario un depósito que sea capaz de amortiguar las diferencias entre la demanda y la producción.

Lógicamente, un depósito muy grande es capaz de amortiguar cualquier cambio en la demanda. Sin embargo, un depósito muy grande tiene más desventajas que ventajas. Primero, un tanque sobredimensionado producirá un aumento innecesario del coste en la instalación de la planta. Y segundo, los tanques de gran tamaño favorecen el crecimiento de microorganismos (ya que se trata de agua estancada).

Así, el depósito óptimo es aquel de menor tamaño que sea capaz de soportar las variaciones en la demanda. Para poder dimensionar correctamente este depósito, resulta fundamental conocer correctamente la curva de demanda (figura 1).

2.3 RECHAZO

La corriente de rechazo tiene una concentración muy alta de sal (depende de la recuperación de agua de permeado, pero puede estar en torno al doble de la concentración de alimentación). Esto supone que deben tomarse medidas para minimizar su impacto ambiental, principalmente si se trata de una planta con una producción elevada (a partir de 200 m³/día).

En la membrana, la corriente de alimentación entra con una presión elevada (40 – 80 bares). El permeado pierde toda la presión al atravesar la membrana, y sale con la presión atmosférica. El rechazo sin embargo, pierde muy poca presión (depende de cada planta, pero en torno a un bar) y sale prácticamente

con la presión que suministró la bomba de alta presión.

Resulta por lo tanto interesante intentar aprovechar la presión de la corriente de rechazo, antes de tirarla. Sobre todo si la planta es grande o si se trabaja con agua marina (donde la presión de trabajo es muy elevada). Para ello, existen diferentes estrategias de recuperación de presión, como son el uso de turbinas Pelton o cámaras isobáricas.

3 LIBRERÍA DE PLANTAS DE ÓSMOSIS INVERSA

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una librería de una planta de ósmosis inversa. La librería está formada por diferentes elementos que el usuario

puede ir interconectando entre sí, para probar un determinado diseño o una cierta estrategia de control.

Los elementos que forman esta librería son:

- Membranas de ósmosis inversa
- Filtros de arena y cartucho
- Sistemas de recuperación de energía como turbinas y cámaras isobáricas
- Bombas centrífugas y de desplazamiento positivo
- Tuberías, válvulas, depósitos
- Elementos de control, tales como controladores PID, PLCs.

El usuario puede manipular los diferentes parámetros de cada uno de estos elementos (dimensiones, curvas características, parámetros de diseño, características del agua, etc.) de manera que se simule una planta real ya conocida.

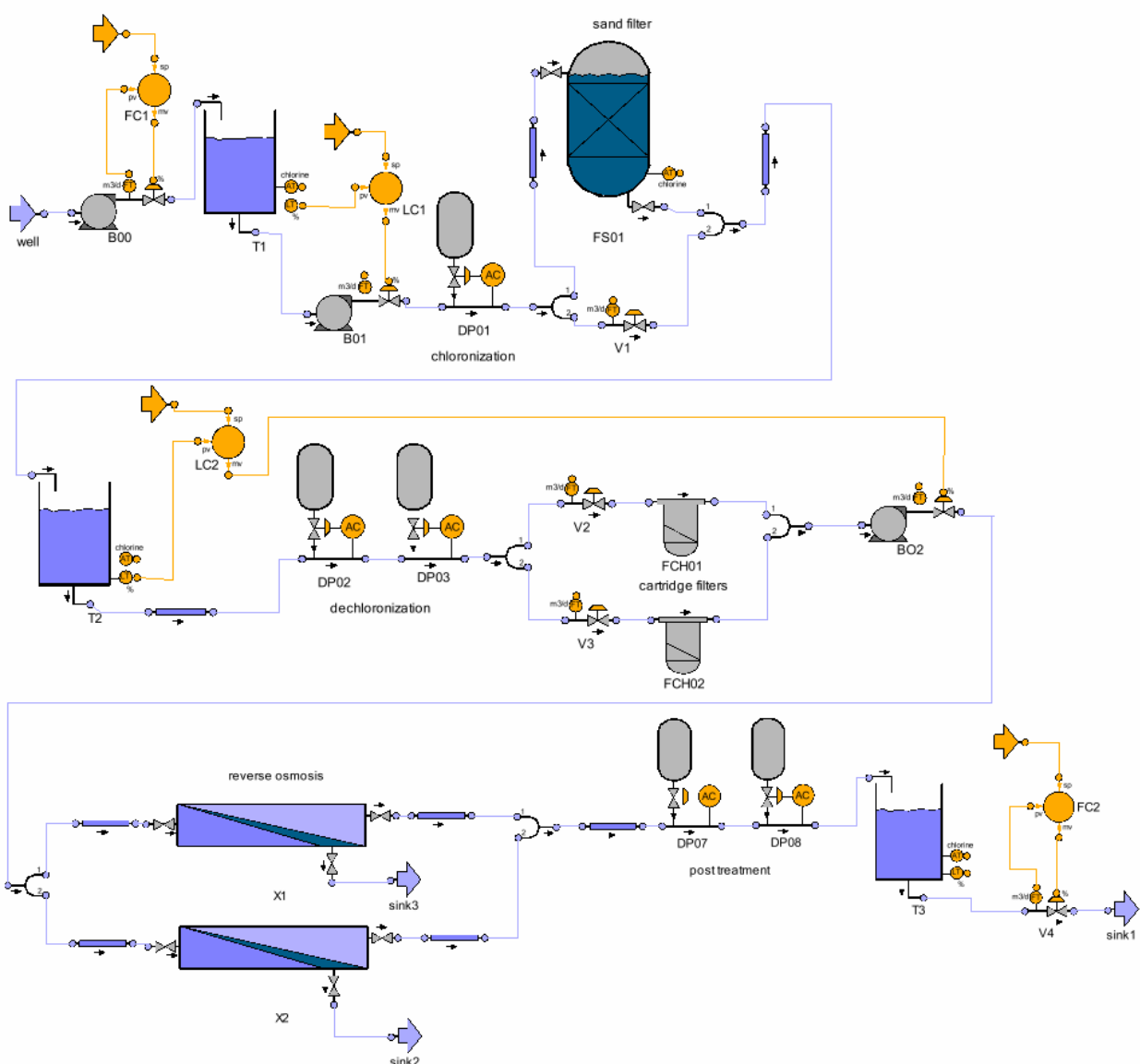


Figura 2: Posible diseño de una planta de ósmosis inversa

La librería ha sido diseñada de manera que resulte fácil de utilizar, sea robusta y reconfigurable. Existen muchos puntos en los que una librería de simulación puede fallar (principalmente cuando es configurada por un usuario): flujos inversos, vaciado de depósitos, redes de tuberías. Estos problemas han sido estudiados y solucionados.

Por otro lado, la planta de ósmosis inversa es un sistema *stiff*, debido a la gran diferencia entre las dinámicas de las distintas variables. Los controladores de flujo tienen una dinámica del orden de los segundos, la concentración a lo largo de una membrana varía en minutos, las limpiezas se realizan cada cierto número de horas, y la permeabilidad de la membrana varía a lo largo de meses. Para poder simular las dinámicas más rápidas, el paso de integración debe ser pequeño. Sin embargo, para poder apreciar las dinámicas más lentas, se requieren un número muy elevado de pasos de integración. Así, se requiere una simulación muy rápida y robusta.

En la figura 2 se presenta un posible diseño de una planta de ósmosis inversa. El agua es bombeada desde el pozo hasta un depósito de almacenamiento T1. A continuación se hace pasar la corriente de alimentación por un filtro de arena y se lleva hasta un segundo depósito T2. Este segundo depósito sirve para amortiguar las variaciones en la producción, así como para almacenar agua limpia usada en la limpieza del filtro de arena. El filtro de arena es un lugar donde fácilmente los microorganismos pueden crecer (ya que la alimentación suele llevar una cierta cantidad de materia orgánica que sirve de alimento para los microorganismos). Para evitar este crecimiento de microorganismos, se dosifica cloro a la entrada del filtro de arena. Sin embargo, además de esterilizar, el cloro también destruye la membrana de ósmosis inversa. Así que, es necesario neutralizar este cloro, por ejemplo, añadiendo bisulfito a la salida del filtro de arena. A continuación se dosifican productos anti incrustantes, se ajusta el pH y se pasa la corriente de alimentación por los filtros de cartucho. Con la bomba de alta presión se eleva la presión de la corriente hasta 40-80 bares y se lleva la corriente hasta las membranas. En este caso se han colocado dos membranas en paralelo. Finalmente se lleva el permeado a un depósito de almacenamiento, se adiciona cloro y se vuelve a ajustar el pH antes de ser consumida por la población.

Esta ha sido una posible configuración, pero la librería desarrollada permite muchas otras configuraciones. Por ejemplo, en la figura 3 se muestra una posible configuración con dos membranas en serie. La figura 4 muestra otra posible configuración con recuperación energética mediante una cámara isobárica así como un control de las limpiezas y paradas mediante un PLC.

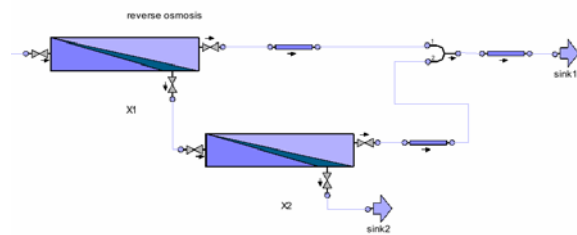


Figura 3: Posible configuración con dos membranas en serie

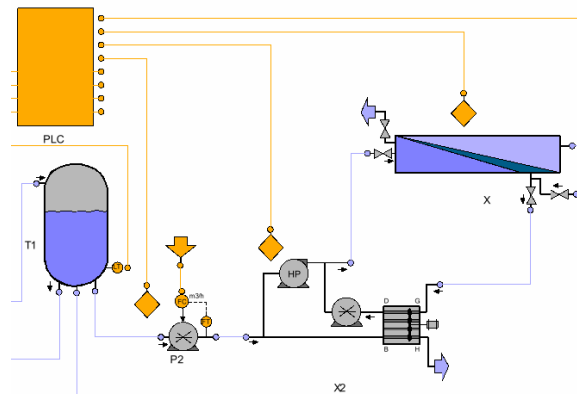


Figura 4: Posible configuración con una cámara isobárica y control por PLC

3.1 FUTUROS ELEMENTOS PARA AÑADIR A LA LIBRERÍA

La librería de plantas de ósmosis inversa puede ser utilizada para optimizar el consumo energético de una planta. Proponiendo diferentes estructuras y características de los elementos y comprobando qué estructura es la que consume una menor cantidad de energía. Sin embargo, aún no se ha incorporado ninguna fuente de energía. En el futuro se pretende incorporar a esta librería diferentes fuentes de energía como son: motores diesel, placas solares, aerogeneradores, etc. Así, el usuario podrá trabajar no sólo con el diseño y optimización de la planta de ósmosis inversa, sino además, estudiar la mejor estrategia para combinar las diferentes fuentes de energía.

4 SIMULACIONES

En el siguiente apartado se muestran diferentes simulaciones obtenidas a partir de la librería de ósmosis inversa desarrollada.

En la figura 5 se muestra la evolución a lo largo de varias semanas de los flujos de alimentación (línea verde), permeado (línea azul oscuro) y rechazo (línea roja). La corriente de alimentación se mantiene constante a lo largo del tiempo. Según pasan los días,

la membrana se va ensuciando, una menor cantidad de agua es capaz de atravesar la membrana, y el flujo de permeado disminuye. De la misma manera, el flujo de rechazo aumenta. Si no se realizase ninguna limpieza, el flujo de permeado alcanzaría el valor de cero, y el rechazo sería igual a la alimentación. Cuando se realiza una limpieza de la membrana, el flujo de permeado y rechazo vuelve a tomar el valor original. En la figura 5 se aprecian claramente las dos limpiezas realizadas.

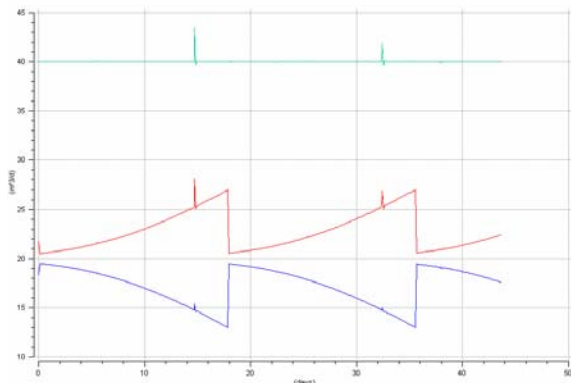


Figura 5: flujo volumétrico de alimentación, permeado y rechazo a lo largo de varias semanas

En la figura 6 se muestra la evolución de la concentración de sal durante de varias semanas. A lo largo de la membrana, la concentración de sal aumenta, al irse retirando parte de agua, que pasa a través de la membrana. La membrana se ha discretizado en una serie de secciones para poder simular este efecto. Las diferentes líneas de la figura 6 representan cada una de estas discretizaciones. Según pasan los días y la membrana se va ensuciando, y una menor cantidad de agua se extrae, la concentración de sal en cada una de las discretizaciones disminuye. En la figura 6 se pueden apreciar también claramente las limpiezas realizadas

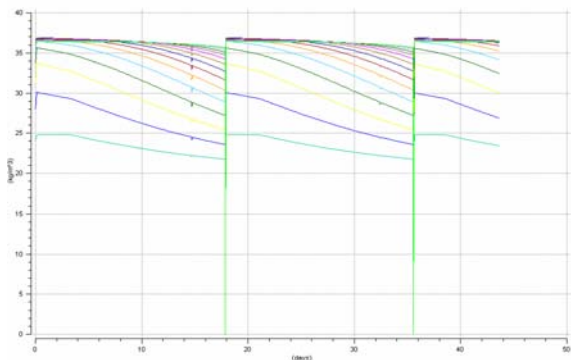


Figura 6: concentración de sal en cada una de las discretizaciones de la membrana a lo largo de varias semanas

En la figura 7 se muestra la evolución a lo largo de varias semanas de la concentración de sólidos en el filtro de arena. De la misma manera que en la

membrana, el filtro de arena ha sido discretizado para tener en cuenta la variación a lo largo del filtro de la concentración de sólidos. Según entra la corriente de alimentación en el filtro de arena, los sólidos van quedando retenidos en las primeras zonas del filtro. Según las primeras zonas van ensuciándose, los sólidos se van depositan en zonas inferiores del filtro. En la figura 7, cada una de las líneas representa una zona o discretización del filtro. La concentración de sólidos en la corriente de salida equivale a la concentración en la última discretización. Según pasan los días, el filtro se va saturando de sólidos y llega un momento que es necesario realizar una limpieza. En la figura 7 se aprecian claramente las dos limpiezas realizadas.

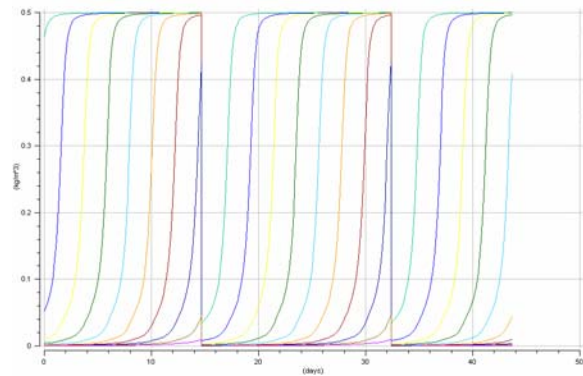


Figura 7: concentración de sólidos en cada una de las discretizaciones del filtro de arena a lo largo de varias semanas

5 CONCLUSIONES

En este documento se ha discutido la importancia de desarrollar modelos adecuados de plantas de ósmosis inversa para la optimización energética y el control avanzado. Para ello se ha presentado una librería dinámica de una planta de ósmosis inversa con la que un usuario pueda estudiar diferentes diseños y estructuras de control. Finalmente se han presentado algunas simulaciones reproducidas con la librería, mostrando su utilidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea dentro del Sexto Programa Marco (Referencia FP6-2004-INCO-MPC-3). Nos gustaría agradecer a SETA S.L y al resto de grupos del proyecto "Open-Gain" por su ayuda y comentarios

Referencias

- [1] Alatiqi I., Ettouney H., El-Dessouky H., (1999) 'Process control in water desalination industry: an overview'. *Desalination*, 126, 15-32

- [2] Gambier A., and Badreddin E. (2004) Dynamic modelling of MSF plants for automatic control and simulation purposes: a survey. *Desalination*, 166, 191-204
- [3] Gambier A., Krasnik A., Badreddin E, (July 11-13, 2007) Dynamic Modeling of a Simple Reverse Osmosis Desalination Plant for Advanced Control Purposes, Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York, USA
- [4] Geislera, P., W. Krummb, T.A. Petersc, (2001) Reduction of the energy demand for seawater RO with the pressure exchange system PES. *Desalination* 135, 205–210
- [5] Robertson, M.W., J. C. Watters, P. B. Desphande, J. Z. Assef, I. M. Alatiqi, (1996) Model based control for reverse osmosis desalination processes. *Desalination*, 104, 59-68
- [6] Seibert U., G. Vogt, C. Brenning, R. Gebhard, F. Holz. (2004) Autonomous, desalination system concepts for seawater and brackish water in rural areas with renewable energies – potentials, technologies, field experience, socio-technical and socioeconomic impacts – ADIRA. *Desalination*, 168, 29-37
- [7] Stover, R.L. (2004) Development of a fourth generation energy recovery device. A 'CTO's Notebook', *Desalination* 165, 313-321
- [8] Wilf M., (2007) The Guidebook to Membrane Desalination Technology, Balaban Desalination Publications, L'Aquila, Italy