

DISEÑO INTEGRADO Y CONTROL USANDO SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA PLANTA 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

Este documento presenta el diseño óptimo de una planta de desalación usando simulación dinámica de una determinada planta de ósmosis inversa. Normalmente el control predictivo se utiliza para calcular el punto de operación, pero este punto de operación, así como el diseño de la planta, puede ser mejorado usando diseño integrado, principalmente el tamaño de los equipos. El objetivo principal del control de la planta es suministrar la demanda de agua (variable a lo largo del día, y a lo largo de los diferentes meses del año) consumiendo la menor cantidad posible de energía, evitando el vaciado y rebose de los depósitos, y teniendo en cuenta una serie de restricciones del sistema, como por ejemplo, la necesidad de realizar limpiezas a los filtros y membranas, o como las limitaciones técnicas de las bombas. En este documento se mostrará cómo el uso del diseño integrado mejora tanto el diseño como el control de una planta específica. Para las simulaciones dinámicas de la planta de desalinización a la que se realiza el estudio se utiliza la herramienta de modelado EcosimPro©.

Palabras Clave: Diseño Integrado, Simulación Dinámica, Plantas de Desalación, Control Híbrido, Optimización Dinámica, EcosimPro©

1 INTRODUCCIÓN

La ósmosis inversa es un método sencillo para la producción de agua potable a partir de agua salobre o marina [6]. Esto es debido al hecho de que las plantas de desalación, que utilizan la ósmosis inversa, necesitan menos energía, coste de instalación, espacio y mantenimiento, que otras plantas que usan otros sistemas de desalación [7]. Por ello, la ósmosis inversa es la técnica idónea para la producción de agua potable [4], [19].

En particular, las plantas de ósmosis inversa son notablemente útiles en el suministro de agua potable en áreas remotas y de difícil acceso. En estos casos, las técnicas de control avanzado son especialmente necesarias, de manera que se pueda reducir y facilitar el mantenimiento, la supervisión por un operario cualificado y el funcionamiento automático de la planta; así como poder evitar las paradas debidas a problemas y fallos en el sistema. Por otro lado, un diseño óptimo de la operación y un correcto diseño integrado de la planta ayudarán a reducir el tamaño y coste de los equipos, disminuyendo además, el consumo de energía, aumentando la vida de los diferentes elementos de la planta, y satisfaciendo la demanda variable de agua de la población. [1], [8], [11], [12], [16]

Este documento está enfocado en el diseño integrado de las plantas de ósmosis inversa, minimizando el tamaño de los equipos, y especialmente, optimizando las dimensiones de los depósitos. Para ello se tiene en cuenta la información disponible de la demanda de agua, el cálculo de la energía consumida y la estrategia de control. La optimización del diseño integrado se realiza utilizando una simulación dinámica de una planta específica [13], utilizando para ello la herramienta de modelado y simulación EcosimPro©, así como las estimaciones de energía disponible y demanda de agua futura. El funcionamiento de una planta de ósmosis inversa mezcla decisiones continuas (como, por ejemplo, el flujo del agua tratada) junto con decisiones discretas (como son las operaciones de limpieza, o el uso de bombas on/off), de manera que el resultado es un problema híbrido.

Este documento está organizado como sigue. En la sección 2 se presenta una pequeña introducción a las plantas de ósmosis inversa. A continuación, en la sección 3 se describe la estrategia de control y el diseño integrado. Finalmente, en la sección 4 se muestran algunos de los resultados obtenidos.

2 PLANTAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Una típica planta de ósmosis inversa se muestra en la figura 1. La bomba de alimentación B1 transporta el agua salobre de un determinado pozo hasta el depósito de almacenamiento T1. Desde este depósito, el agua es conducida hasta la bomba de alta presión B2, que aumenta la presión de la corriente hasta un valor superior a su presión osmótica. A continuación, la corriente de agua presurizada es llevada a un rack de membranas de ósmosis inversa. El gradiente de presión a cada lado de las membranas produce que parte del agua de alimentación circule a través de la membrana, obteniéndose una corriente de agua pura. Esta agua tratada es almacenada en el depósito T2. De aquí, una vez realizados una serie de post tratamientos, se obtiene el agua necesaria para satisfacer la demanda de la población. Una descripción más detallada de los componentes de una planta de ósmosis inversa se puede encontrar en [2].

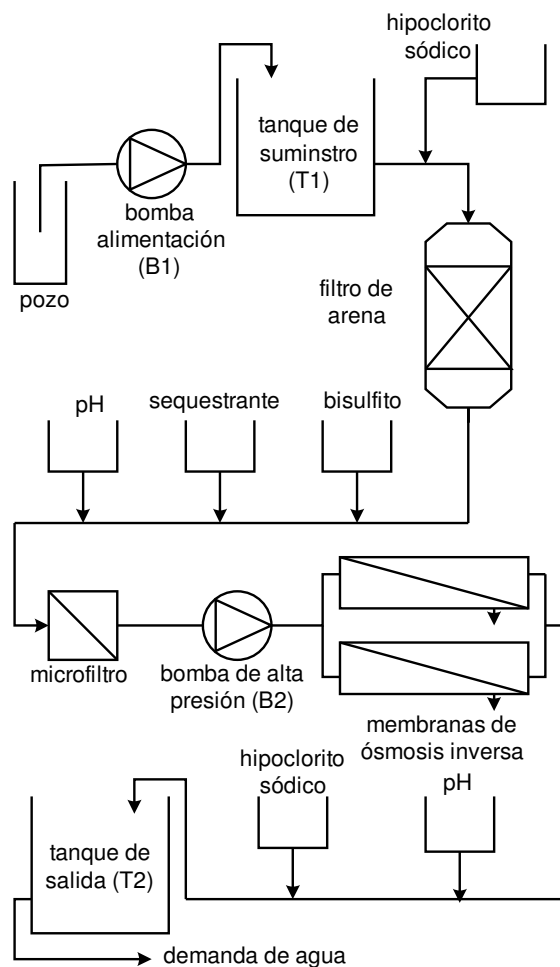


Figura 1: Típica planta de ósmosis inversa

2.1 PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es un proceso de separación que usa la presión para forzar a un solvente (agua) a pasar a través de una membrana semipermeable. Esta membrana retiene el soluto (sal) en un lado y permite pasar a través suyo el solvente puro al otro lado. De esta manera, a partir de una corriente de agua salobre, se obtiene una corriente de agua pura, que pasa a través de la membrana, y llamada “permeado” y una corriente de agua con una mayor concentración de sal que la alimentación, que no ha pasado a través de la membrana y es llamada “rechazo”.

Este proceso requiere una alta presión en el lado de la alimentación (superior a 50 bares en casos de agua marina de muy alta salinidad). Esta presión es suministrada por una bomba de alta presión que es la responsable de la mayor parte del consumo de energía eléctrica de la planta.

El problema principal durante el funcionamiento de la planta es la caída progresiva del rendimiento de las membranas, debido al ensuciamiento por parte de componentes orgánicos que precipitan, sales que cristalizan, y otros componentes que se adsorben a la superficie de la membrana. Para evitar esta situación, es necesario realizar un pretratamiento a la corriente de alimentación. Este pretratamiento consiste en la filtración del agua, junto a la adición de componentes químicos que evitan la precipitación de los compuestos solubles, así como el crecimiento de poblaciones de microorganismos. Además, limpiezas periódicas son llevadas a cabo para eliminar posibles sustancias que han precipitado sobre la membrana.

Con el fin de hacer potable la corriente de agua pura obtenida en las membranas, es necesario a continuación, realizar un post tratamiento. Este proceso normalmente consiste en un ajuste del pH, la adición de compuestos químicos para eliminar los microorganismos y un aumento moderado de la salinidad del agua mediante la mezcla correcta con una parte de la corriente de alimentación pretratada.

3 DISEÑO INTEGRADO

El objetivo del diseño integrado es diseñar una planta de manera óptima, (en este caso, minimizando el tamaño de los depósitos), teniendo en cuenta la estrategia de control. El principal objetivo del control es ser capaz de suministrar una demanda de agua durante un horizonte de tiempo dado y teniendo en cuenta una serie de restricciones [18], [10].

3.1 DEMANDA DE AGUA

La demanda de agua, que varía a lo largo del día, es aproximadamente una curva periódica que se repite cada 24 horas [3]. La estimación de la forma de la curva de demanda de agua es fundamental para poder realizar un correcto diseño de la planta de desalinización. Sin embargo, esta estimación es fácilmente llevada a cabo a partir de las medidas históricas del consumo de agua de una determinada población.

La figura 2 muestra una curva típica de demanda de agua a lo largo de dos días. En la figura puede apreciarse que durante la noche, el consumo de agua alcanza su valor mínimo, mientras que por la mañana se obtiene el máximo diario de la curva. Es importante tener en cuenta que, además de las variaciones a lo largo de un día, la curva de demanda de agua varía considerablemente cada día de la semana, y especialmente, cada mes del año.

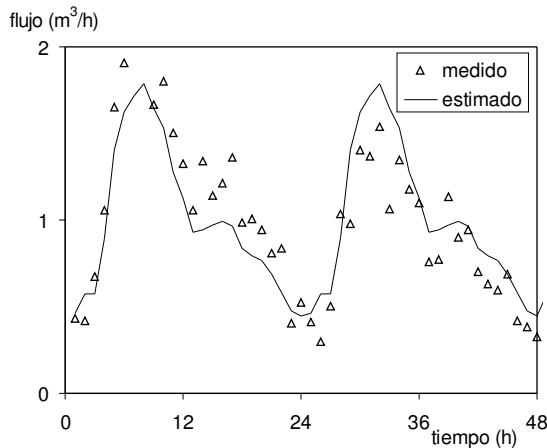


Figura 2: Demanda de agua: Medida y Estimada
Flujo de agua (m³/h) vs tiempo (h).

3.2 VARIABLES DE CONTROL

El objetivo de control es formulado desde el punto de vista económico: ser capaz de suministrar el consumo de agua potable, minimizando el consumo de energía y realizando para ello cambios suaves en las variables manipuladas.

El cálculo de la estrategia de control se realiza para un determinado horizonte de control. Se utiliza una simulación dinámica para predecir la evolución de las diferentes variables de la planta de ósmosis inversa, durante este tiempo. En el caso de estudio, el horizonte de control seleccionado es de 48 horas.

Con el fin de suministrar la demanda de agua, las variables que pueden ser manipuladas son:

- el flujo de la bomba de alimentación (B1).
- el flujo de la bomba de alta presión (B2).
- los instantes de las limpiezas de las membranas.

En la planta específica estudiada en este documento, y que representa un caso típico, la bomba de alimentación (B1) es una bomba centrífuga tipo on/off, que puede suministrar una corriente de agua varias veces superior al máximo que puede suministrar la bomba de alta presión (B2). De esta forma, la bomba B1 permanecerá apagada la mayor parte del tiempo. Con el objetivo de formular el problema de optimización en términos prácticos, se utiliza una parametrización de la operación de esta bomba a través de un vector de entradas, como se puede apreciar en la figura 3.

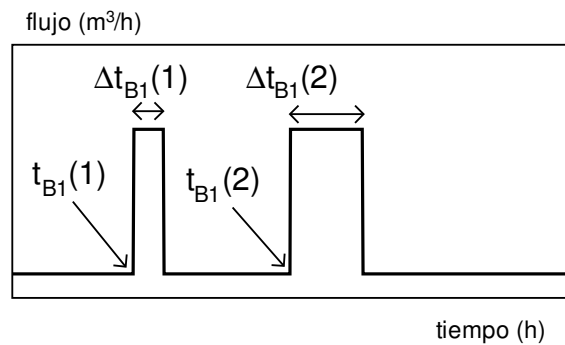


Figura 3: Parametrización de la bomba B1
Flujo de agua (m³/h) vs tiempo (h).

La bomba de alta presión (B2), en el caso de estudio, es una bomba de desplazamiento con un variador de velocidad. El flujo nominal de la bomba es de 1 m³/h, aunque su velocidad puede ser modificada aproximadamente un 30% sobre el valor nominal. Así, las variables manipuladas que pueden ser modificadas en la bomba B2 son n diferentes valores del flujo de esta bomba, a lo largo del horizonte de control. Donde n es un valor fijado por el usuario. Ver la figura 4.

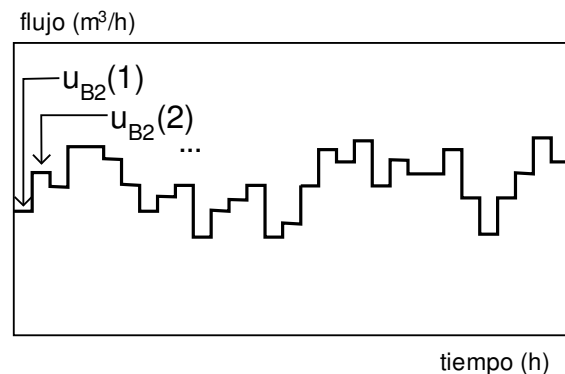


Figura 4: Parametrización de la bomba B2
Flujo de agua (m³/h) vs tiempo (h).

Como fue mencionado anteriormente, para poder aumentar la vida de las membranas, es importante realizar un adecuado pretratamiento así limpiezas periódicas de las membranas. Aunque existen varios tipos de limpiezas, en este documento solo se considera una limpieza de 30 minutos de duración, realizada una vez cada 24 horas, utilizando para ello parte del perneado producido. Ver figura 5.

3.3 RESTRICCIONES

La estrategia de control tiene que cumplir con una serie de restricciones. La restricción principal es el hecho de mantener el nivel de agua de los tanques (T1 y T2) entre un cierto valor mínimo y máximo. De manera que se pueda asegurar que la demanda de agua se satisfaga.

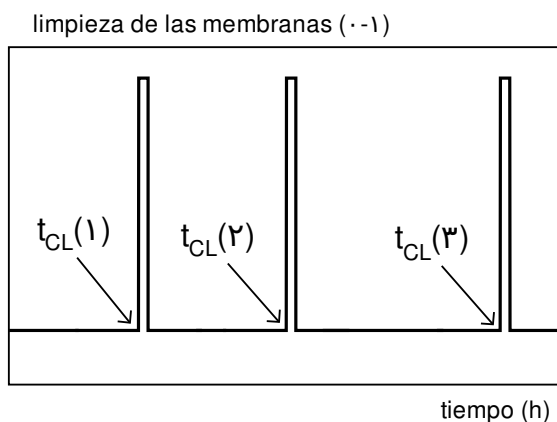


Figura 5: Parametrización de las limpiezas

Además, varias restricciones relacionadas con las variables manipuladas son tenidas en cuenta. Después del encendido de la bomba de alimentación (B1), el siguiente apagado no puede ser realizado hasta después de un mínimo periodo de tiempo. De la misma manera, existe un mínimo tiempo entre un apagado y el siguiente encendido de la bomba.

En la bomba de alta presión (B2), la diferencia entre dos cambios consecutivos está limitada por un cierto valor máximo, de manera que se suavice la operación de las membranas.

Finalmente, es necesario realizar una limpieza de las membranas cada 24 horas. Es decir, el tiempo máximo entre dos limpiezas es de 24 horas. Otros tipos de limpiezas, como barridos o limpiezas químicas no son consideradas en este documento.

3.4 OPTIMIZACIÓN

En la figura 6 se muestra la estructura de la optimización usada en este documento. El

optimizador utiliza la estimación de la demanda de agua y las medidas del consumo de agua, nivel de agua en los depósitos y flujos, para calcular el punto de trabajo óptimo en cada momento [5], [15].

La optimización dinámica híbrida ha sido reformulada en términos continuos usando la parametrización comentada anteriormente [14]. Matemáticamente, el problema del diseño integrado puede ser formulado como la minimización de la siguiente función de coste (que tiene en cuenta el tamaño de los depósitos, el consumo de energía y los esfuerzos de control):

$$J = \beta_1 \int_0^{48h} E \cdot d\tau + \frac{\beta_2}{n_{B2}} \sum_{n_{B2}} \Delta u_{B2}^2 + \beta_3 \sum_i h_i \cdot s_i \quad [1]$$

donde: β_1 , β_2 y β_3 son factores de peso,

E es el consumo de energía (kW),

h_i y s_i son la altura y el área cruzada de los depósitos.

n_{B2} es el número relacionado con la parametrización de la bomba B2.

Δu_{B2} son los cambios entre dos valores consecutivos de los flujos de la bomba B2.

El control predictivo continuará trabajando cada tiempo de muestreo. Nuevos valores de las variables manipuladas serán calculados por el optimizador. Pero el diseño integrado, teniendo en cuenta el tamaño de los depósitos, se realiza solo en el momento del diseño de la planta.

3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una descripción detallada de la planta específica sobre la que se ha realizado este estudio, fue desarrollado y validado en una planta piloto real [12], [13]. Usando la estructura del diseño integrado presentada en la sección 4, el tamaño óptimo calculado de los depósitos es:

- altura del tanque T1 = 2.1 m
- sección cruzada del tanque T1 = 1.5 m²
- altura del tanque T2 = 2.9 m
- sección cruzada del tanque T2 = 2 m²

Cuando fue realizado el diseño de los depósitos sin tener en cuenta el diseño integrado, es decir, solo teniendo en cuenta las predicciones de demanda de agua, pero no la estrategia de control, las dimensiones del tanque T1 fueron similares, pero en

el caso del tanque T2, sus dimensiones calculadas fueron:

altura del tanque T2 = 3.0 m
sección cruzada del tanque T2 = 10 m²

Es decir, varias veces superior al tanque calculado mediante el diseño integrado.

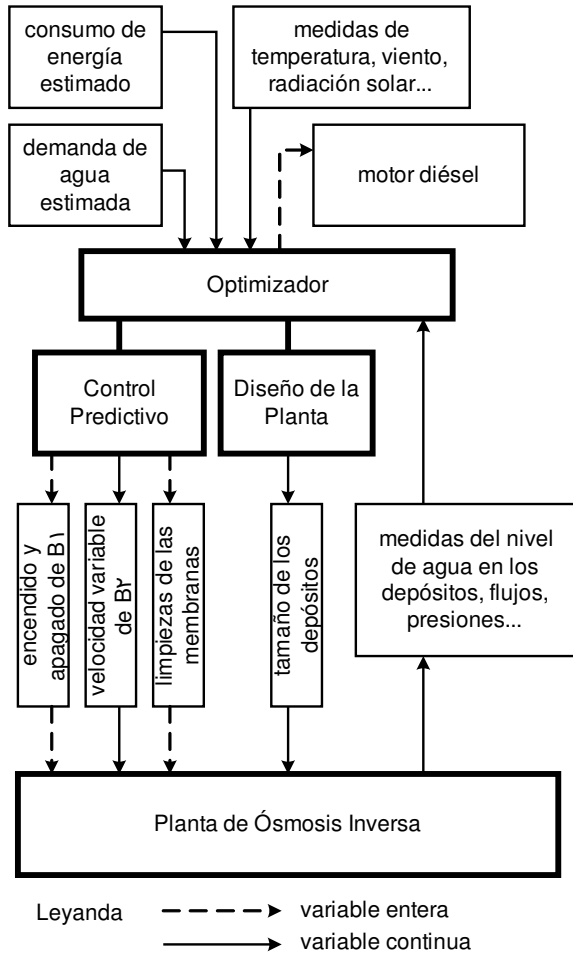


Figura 6: Estructura de la optimización de la planta de ósmosis inversa

Los flujos calculados de la bomba de alimentación (B1) y de la bomba de alta presión (B2) se muestran en la figura 7. Por otro lado, los instantes en los que se realiza la limpieza de las membranas se muestran en la figura 8.

Finalmente, la figura 9 muestra el nivel de líquido del tanque de salida (T2), con y sin estrategia de control. Se puede apreciar que sin estrategia de control (velocidad de la bomba de alta presión constante), el nivel de líquido excede las restricciones y la demanda de agua no es satisfecha.

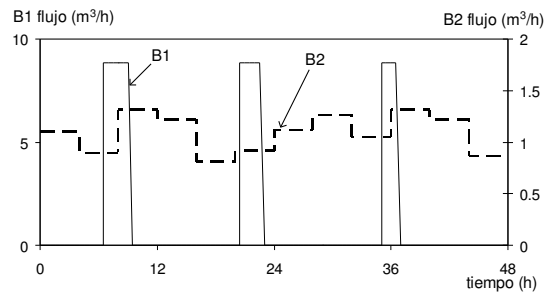


Figura 7: Operación de las bombas
Flujo de agua (m³/h) vs tiempo (h).

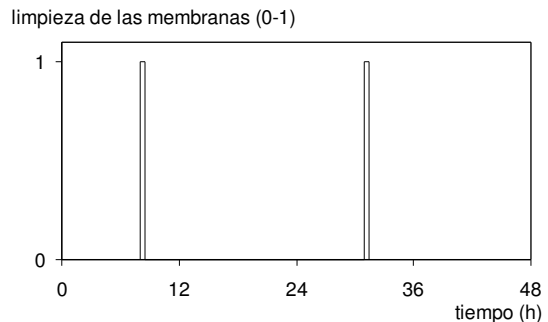


Figura 8: Instantes de las limpiezas de las membranas

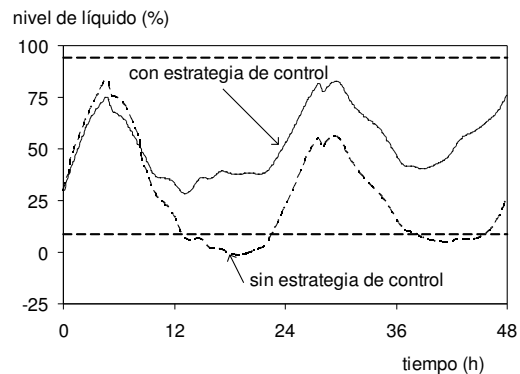


Figura 9: Nivel de agua del tanque T2
Nivel de agua (%) vs tiempo (h).

3 CONCLUSIONES

Este documento muestra el diseño integrado de una planta de ósmosis inversa específica, junto al control predictivo y a la simulación dinámica. El objetivo principal es aumentar la eficiencia de la planta, aumentar la vida útil de los componentes y reducir los costes de instalación y mantenimiento. El uso de la optimización está basado en la reformulación del problema de control en términos de variables continuas que evitan la optimización mixta entera e integra el proceso desde un punto de vista económico. Los resultados preliminares son prometedores, en el sentido que se logra una adecuada estrategia de control, cumpliendo los

objetivos del control sin un excesivo uso de la energía.

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., H. Ettouney, and H. El-Dessouky, 'Process control in water desalination industry: an overview'. *Desalination*, 126, 15-32, 1999.
- [2] Al-Bastaki, N. M. and A. Abbas, Modeling an industrial reverse osmosis unit. *Desalination*, 126, 33-39, 1999.
- [3] Alvisi S., Franchini M. and Marinelli A. A short-term, pattern-based model for water-demand forecasting, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 9, pp. 39-50., 2007
- [4] Baker R. W. *Membrane Technology and Applications*, Wiley, 2004
- [5] Dadebo SA, McAuley KB, Dynamic optimization of constrained chemical engineering problems using dynamic programming, *Computers and Chemical Engineering*, Elsevier, 1995
- [6] Fritzmann C., Löwenberg J., Wintgens T., and Melin T, State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination*, Vol. 216, pp. 1 – 76, 2007
- [7] Gambier, A., A. Krasnik, and E. Badreddin, Dynamic Modeling of a Simple Reverse Osmosis Desalination Plant for Advanced Control Purposes, *Proc. of the American Control Conference*. New York, USA, 2007.
- [8] Gambier, A. and E. Badreddin. Dynamic modelling of MSF plants for automatic control and simulation purposes: a survey. *Desalination*, 166, 191-204, 2004.
- [9] Giebel, Gregor, The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power. Project ANEMOS ENK5-CT-2002-00665, 2003.
- [10] Henderson P, Bedworth D, Wolfe P, *Computer integrated design and manufacturing*. Inc New York, NY USA, McGraw-Hill, 1991
- [11] Mindler A. and A. Epstein. System identification and control of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 59, 343-379, 1986.
- [12] Palacin, L., C. de Prada, S. Syafii, F. Tadeo. Library for Dynamic Simulation of Reverse Osmosis Plants, *Proc. of 20th European Modeling and Simulation Symposium*, Sep. 17-19, Briatico, Italy. 2008
- [13] Syafii, S., L. Palacin, L., C. de Prada, F. Tadeo. Membrane Modeling for Simulation and Control of Reverse Osmosis in Desalination Plants, In: *Proc. of Control 2008*, September 2-4, Manchester, UK. , 2008
- [14] Sarabia D., Capraro F., Larsen L. F. S., de Prada C., Hybrid NMPC of supermarket display cases, *Control Engineering Practice*, Vol. 17, Iss. 4, 2009, pp.428-441
- [15] Seborg DE, Edgar TF, Mellichamp, *Process dynamics and control*, Wiley, New York, 1989
- [16] Seibert U., G. Vogt, C. Brenning, R. Gebhard, and F. Holz. Autonomous, desalination system concepts for seawater and brackish water in rural areas with renewable energies. *Desalination*, 168, 29-37, 2004.
- [17] Thomas PJ, Bhattacharyya S, Patra, Steady state and dynamic simulation of multi-stage flash desalination plants A case study, *Computers and Chemical Engineering*, Elsevier, 1998
- [18] Wiley John, *Systems approach to computer-integrated design and manufacturing*. NY, USA, N Singh, 1995
- [19] Wilf M. *The Guidebook to Membrane Desalination Technology*, Balaban Desalination Publication, L'Aquila, Italy, 2007