

## **CONTROL DE UN SISTEMA AUTÓNOMO CON GENERACIÓN EÓLICA PARA DESALINIZACIÓN DE AGUA POR ELECTRODIÁLISIS**

**Ricardo J Mantz<sup>a,1</sup>, Roberto D Fernández<sup>b,2</sup>, Pedro Battaiotto<sup>a,3</sup>, Ramiro Peña<sup>b,4</sup>**

LEICI. Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales.  
Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP. C.C.91 C.P. 1900 – La Plata.

Tel. 0221-4259306 e-mail: [mantz@ing.unlp.edu.ar](mailto:mantz@ing.unlp.edu.ar)

Laboratorio de Automatización y Control, Facultad de Ingeniería, UNPSJB

Ciudad Universitaria Km 4, 9005 Comodoro Rivadavia.

Tel. 0297-4557890. [dfernandez@unpata.edu.ar](mailto:dfernandez@unpata.edu.ar)

*Recibido 08/08/18, aceptado 11/09/18*

**RESUMEN:** Se aborda el análisis y control de un sistema autónomo de potabilización de agua a partir del recurso eólico. El mismo consta del subsistema de generación (turbina eólica y generador sincrónico) y del de potabilización de agua (electrodializador y bomba centrífuga impulsada con motor de inducción). Si bien el sistema tiene una estructura de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), consideraciones de orden práctico habilitan la implementación de un control descentralizado. Los controladores que se proponen, basados en conceptos de regímenes deslizantes, garantizan dos objetivos dentro de su rango de operación: -1) que la salinidad (concentración) del *agua producto* esté por debajo de un nivel de referencia, independientemente de la intensidad del recurso eólico, del caudal bombeado y de la concentración inicial de sales; -2) que el proceso de desalinización refleje sobre el generador eólico, una carga mecánica que permita la máxima extracción de energía del recurso para cada velocidad del viento. Estos objetivos conducen a maximizar la cantidad de agua producto obtenible.

**Palabras clave:** energía eólica, desalinización, electrodiálisis, modos deslizantes.

### **INTRODUCCION**

El agua es un elemento esencial para la vida y desarrollo de las actividades humanas. Sólo el 2,5% del agua en nuestro planeta es potable y se encuentra seriamente comprometida por la creciente demanda y contaminación. El 97,5 % restante presenta altas concentraciones de sal y otras sustancias que la hacen no apta para el consumo humano.

Si bien se conocen desde hace tiempo distintos métodos para la desalinización del agua, recién en los últimos años se han alcanzado los progresos tecnológicos que permiten la instalación de plantas de desalación a costos moderados. Sin embargo, estas tecnologías aún presentan costos elevados para aplicaciones autónomas a baja escala donde los recursos energéticos son escasos.

Las tecnologías de membrana, particularmente la de ósmosis inversa (OI) y la de electrodiálisis (ED), son las que han alcanzado mayor desarrollo y aceptación en los años recientes (Al-Karaghoulí and A, Kazmerski L, 2013). La ósmosis inversa es la más empleada debido fundamentalmente a razones económicas, ya que los costos de energía en la electrodiálisis se incrementan significativamente cuando se requieren altas densidades de corrientes. Ello hace que esta tecnología aún no sea competitiva frente a la de osmosis inversa en plantas grandes (Strathmann, 2004), pero si pueda serlo en sistemas pequeños y autónomos que emplean energías renovables

---

<sup>1</sup> Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, UNLP. Investigador Principal CICpBA.

<sup>2</sup> Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, UNPSJB.

<sup>3</sup> Profesor Consulto, Facultad de Ingeniería, UNLP.

<sup>4</sup> Docente, Facultad de Ingeniería, UNPSJB. Becario Postdoctoral CONICET

La tecnología de desalación por electrodiálisis presenta importantes ventajas sobre otras tecnologías de membrana:

- se alcanzan menores niveles de concentración de sales y tiene un buen comportamiento frente a elementos como el Ba, Sr o sulfatos;
- no aporta un efecto barrera, como si lo hacen las otras técnicas de membrana;
- a diferencia de la OI, en plantas de electrodiálisis pueden agregarse oxidantes al agua de entrada (cloro) lo cual evita la incrustación de micro organismos vivos en las membranas;
- si se emplea la técnica de ED reversible (EDR) puede obtenerse una menor relación entre concentración de salida a concentración de entrada, lo cual permite un mejor aprovechamiento del agua cuando ésta es escasa;
- su rendimiento mejora a temperatura elevada y para iones con varias cargas;
- es una técnica más robusta frente a cambios en la calidad del agua o paradas del sistema (Palau, 2009).

Esta última propiedad la hace potencialmente atractiva para aplicaciones autónomas a partir de recursos renovables intermitentes (eólica, solar,...) y muy particularmente cuando se dispone de una capacidad de almacenamiento limitada. Adicionalmente, dado que el mayor limitante del empleo de esta tecnología está vinculado al costo de la energía, es de interés evaluar su complemento con recursos renovables. Tener en cuenta que en aplicaciones autónomas en regiones aisladas el costo de proveer energía para desalinización a partir de recursos convencionales suele ser excesivamente alto o inaccesible.

En este trabajo se propone un sistema autónomo para desalación de agua por electrodiálisis, a partir de energía eólica. Más allá de la estructura MIMO del sistema, consideraciones de orden práctico, permiten proponer un control descentralizado en términos de modos deslizantes. El control tiene por objetivo garantizar la calidad del agua producto más allá de las variaciones del recurso eólico, del caudal de entrada y de la concentración inicial del agua. El trabajo está organizado de la siguiente manera. La Sección II se destina a remarcar conceptos del proceso de electrodiálisis para la potabilización del agua. En la Sección III se plantea el modelo del sistema autónomo de desalación. En la Sección IV se describe el control propuesto y en la Sección V se muestran resultados que permiten comprender el comportamiento del control propuesto. Por último, las conclusiones del trabajo, se resumen en la Sección VI.

## **DESALINIZACIÓN POR ELECTRODIÁLISIS**

La electrodiálisis fue uno de los primeros procesos de desalinización de agua por membrana disponibles a escala comercial. Ha alcanzado una experiencia operativa confiable a largo plazo y tiene ventajas técnicas en la desalinización de agua salobre y el tratamiento de aguas residuales. El principio de funcionamiento se basa en la aplicación de un campo eléctrico para transferir los iones del agua salada de entrada a otra solución a través de membranas selectivas al paso de cationes o aniones. Como resultado de este proceso se obtiene un agua producto con baja concentración de sales y un subproducto de rechazo con elevada concentración (salmuera). Las dos corrientes de agua fluyen en paralelo entre las membranas. Mientras el agua producto se desaliniza progresivamente, la salmuera va incrementando su concentración. Los cationes o aniones del agua a tratar, atraviesan las membranas catiónica o aniónica y se desplazan hacia el cátodo o ánodo pasando consecuentemente a formar parte del flujo de salmuera. El sentido y la tasa del transporte de cada ion dependen de su carga y su movilidad, de la conductividad de la solución, de las concentraciones relativas, de la intensidad del campo eléctrico aplicado, y está estrechamente relacionado con las características de la membrana de intercambio iónico.

Los requerimientos de energía en un proceso de potabilización de agua por electrodiálisis se deben básicamente a cuatro factores:

- la energía requerida para el transporte de iones de la solución a desalinizar;
- la energía necesaria para bombear las soluciones a través del electrodiálizador, desde un depósito de alimentación hasta el tanque de agua producto y la eliminación de salmuera;
- la energía consumida por las reacciones en los electrodos;
- la energía requerida en la instrumentación y control.

En general, los últimos términos pueden ser desestimados frente a los dos primeros (Palau, 2009).

La potencia demandada por el electrodiálizador es

$$P_{ed} = V_{ed} I = \frac{V_{ed}^2}{NR_{ed}} \quad (1)$$

con  $N$  el número de celdas anidadas y  $R_{ed}$  la resistencia óhmica no lineal del proceso. La principal componente óhmica del sistema es aportada por la solución líquida, ya que las membranas tienen una muy baja resistencia eléctrica. Así,  $R_{ed}$  se puede expresar en función de la concentración de la solución como

$$R_{ed} = \frac{h}{\kappa A_M} \quad (2)$$

donde  $\kappa = \Lambda_M c$  es la conductividad de la solución,  $c$  la concentración,  $\Lambda_M$  la conductividad molar y  $A_M$  es el área efectiva entre las membranas. Para bajas concentraciones,  $\Lambda_M$  puede expresarse como

$$\Lambda_M = \Lambda_M^0 - Ac^{0.5} \quad (3)$$

donde  $\Lambda_M^0$  es la conductividad molar límite y  $A$  una constante. Ambos parámetros son propios de los iones considerados. A su vez la concentración de salida es una función compleja del caudal  $Q$ , la tensión  $V_{ed}$  y la concentración inicial  $c_0$ . En Sadrzadeh et al (2007), Goulin (2009) y Troncoso et al (2014) se indican procedimientos a los efectos de vincular la concentración de salida con las variables tensión, caudal y concentración del electrodiálizador.

### SISTEMA EÓLICO DE DESALINIZACIÓN

La figura 1 muestra un esquema del sistema bajo estudio. Una turbina impulsa el generador sincrónico GS de imanes permanentes que alimenta el sistema de desalinización a través de un rectificador trifásico a diodos. El bloque  $R$  incluye tanto el rectificador como el correspondiente filtro  $LC$ . Se considera un rectificador no controlado ya que, a pesar de imponer mayores restricciones en el diseño, presenta ventajas económicas y de robustez para operar en regiones aisladas y con dificultades de mantenimiento. En el planteo del modelo, sólo se consideran los subsistemas más relevantes del sistema de desalación: el de bombeo y el electrodiálizador. El subsistema de bombeo consiste de un motor de inducción que impulsa una bomba centrífuga. El conjunto se controla a través de un convertidor DC/AC que excita al motor de inducción con una relación tensión/frecuencia constante. El subsistema de purificación del agua está constituido, básicamente, por el electrodiálizador. La variable de salida del sistema es la concentración de sal en el agua producto, la cual es función de la tensión, del caudal del agua bombeada y de la salinidad o concentración inicial. La concentración de salida se controla a partir de variables eléctricas con un convertidor DC/DC.

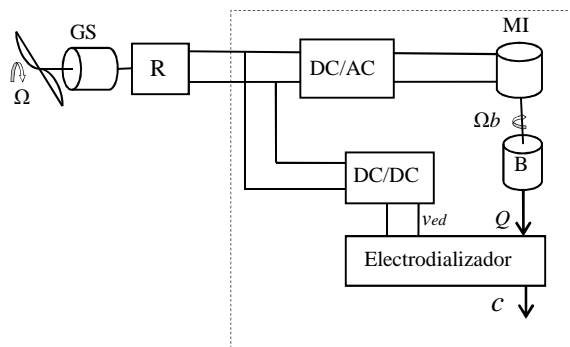


Fig. 1. Sistema autónomo estudiado.

El comportamiento dinámico dominante en la turbina eólica está definido por

$$\dot{\Omega} = \frac{T_t - T_e}{J_{t+g}}, \quad (4)$$

donde  $\Omega$  es la velocidad de la turbina,  $J_{t+g}$  es el momento de inercia del conjunto turbina-generator,  $T_e$  es el par eléctrico del generador que refleja la carga sobre el eje de la turbina y

$$T_t = \frac{k C_p(\lambda) v^3}{\Omega}, \quad (5)$$

es el par de la turbina con  $v$  la velocidad del viento,  $C_p(\lambda)$  el coeficiente de potencia de la turbina,  $\lambda$  la relación de velocidades de punta de pala y  $k$  una constante que depende de las dimensiones de la turbina. Para la relación de punta de pala óptima  $\lambda = \lambda_o$ , el par de la turbina  $T_t = T_o$  permite la máxima captura de energía en cada velocidad del viento.

A su vez, si el motor que impulsa la bomba opera con flujo constante  $\psi_m$ , su par y potencia pueden expresarse por

$$T_m = 3 \frac{P_m}{2} \psi_m^2 \frac{\omega_{sl} R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2}, \quad (6)$$

$$P_m = 3 \frac{P_m}{2} \psi_m^2 \frac{\omega_{sl} R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \Omega_b, \quad (7)$$

donde  $pm$  es el número de pares de polos,  $L_r$  y  $R_r$  la inductancia y resistencia del rotor. La velocidad de la bomba  $\Omega_b$  resulta de la ecuación dinámica

$$\dot{\Omega}_b = \frac{T_m - T_b}{J_{b+m}}, \quad (8)$$

siendo  $J_{b+m}$  el momento de inercia del sistema de bombeo (motor más bomba) y

$$T_b = k_b \Omega_b^2 = \frac{4}{p_m^2} k_b \omega_b^2, \quad (9)$$

con  $\omega_b$  la frecuencia angular correspondiente a la velocidad de la bomba. Luego, el par reflejado sobre el eje de la turbina es

$$T_e = \frac{P_m + P_{ed}}{\Omega} = 3 \frac{P_m}{2} \psi_m^2 \frac{\omega_{sl} R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \frac{\Omega_b}{\Omega} + \frac{P_{ed}}{\Omega} \quad (10)$$

siendo  $P_m + P_{ed}$  la potencia total de la carga, es decir la del subsistema de bombeo y la del electrodiálizador.

### Ecuaciones de Estado para el Control del Sistema.

Luego, eligiendo los estados  $x^T = [\omega_b \ \Omega \ c]$  (e.d. la frecuencia angular de la bomba, la velocidad de giro de la turbina y la concentración del agua producto) y como acción de control  $u$  la frecuencia de excitación del motor de inducción  $\omega_e$ ,

$$\dot{x}_1 = \frac{3 \frac{P_m}{2} \psi_m^2 \frac{(u-x_1) R_r}{R_r^2 + (u-x_1)^2 L_r^2} - \frac{4}{p_m^2} k_b x_1^2}{J_{b+m}} \frac{P_m}{2} \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\frac{k C_p (\lambda) v^3}{x_2} - 3 \frac{P_m}{2} \psi_m^2 \frac{(u-x_1) R_r}{R_r^2 + (u-x_1)^2 L_r^2} \cdot \frac{x_1}{x_2} \frac{2}{P_m}}{J_{b+m}} \quad (12)$$

$$\dot{x}_3 = -\lambda_{ed} x_3 (Q(x_1), c_0, v_{ed}) + k_{ed} v_{ed} \quad (13)$$

Considerando que el motor trabaja en la zona de bajo resbalamiento, su par puede aproximarse por

$$T_m = 3 \frac{P_m}{2} \frac{\psi_m^2}{R_r} (u - x_1) = k_m (u - x_1). \quad (14)$$

A su vez el par de carga del generador sincrónico será

$$T_e = \frac{T_m \Omega_b + P_{ed}}{\Omega} = \frac{2k_m (u - x_1) x_1}{P_m x_2} + \frac{P_{ed}}{x_2}. \quad (15)$$

Así, el modelo dinámico  $\dot{x} = f(x, u)$  puede simplificarse a

$$\dot{x}_1 = \frac{k_m (u - x_1) - \frac{4}{P_m^2} k_b x_1^2}{J_{b+m}} \cdot \frac{P_m}{2} \quad (16)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k C_p (\lambda) v^3 - k_m (u - x_1) x_1 \frac{2}{P_m} - P_{ed}}{x_2 J_{t+g}} \quad (17)$$

$$\dot{x}_3 = -\lambda_{ed} x_3 (Q(x_1), c_0, v_{ed}) + k_{ed} v_{ed} \quad (18)$$

Notar que

-el modelo previo corresponde a las dinámicas dominantes del sistema. No se han incluido las dinámicas de los convertidores. Sin embargo, en la próxima sección nos detendremos en el control del convertidor DC/DC ya que es importante verificar su estabilidad cuando se implementa el control de concentración del electrodiálizador. Garantizada la misma, su dinámica eléctrica puede omitirse frente a la de los estados dominantes;

-si bien el modelo (16)-(18) es de múltiples entradas y salidas, su estructura permite algunas simplificaciones desde el punto de vista del control. En particular, plantear un esquema descentralizado del controlador;

-los dos primeros estados corresponden a variables mecánicas, mientras que el tercero presenta una dinámica más rápida asociada a las variables eléctricas y a la constante de tiempo del transporte de los iones. En realidad, esta constante de tiempo está asociada a  $R_{ed}$  que a su vez depende de la concentración de iones. Luego varía a lo largo del electrodiálizador y, por consiguiente, la constante de tiempo aumenta a medida que el agua se potabiliza. Sin embargo, con las nuevas tecnologías de electrodesionización CEDI que incorporan resinas en el flujo de agua,  $R_{ed}$  toma valores chicos a lo largo de todo el electrodiálizador, garantizando constante de tiempo chicas (Wood and Gifford, 2014). Dado que el caudal de bombeo se corresponde con los estados mecánicos, el tercer estado puede ver al caudal como una perturbación lenta.

## CONTROL DEL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN

En base a las consideraciones previas sobre la estructura del modelo, se propone un control descentralizado por modos deslizantes para cumplir simultáneamente con dos objetivos

- Control y regulación de la concentración en el agua producto, independientemente de la velocidad del recurso, del caudal y de la concentración inicial.
- Control de par de carga en la turbina eólica, para optimizar la captura de energía a diferentes velocidades del viento.

### Control del subsistema de bombeo

Como objetivo de control planteamos que el sistema de purificación de agua, bombeo más electrodiálizador, refleje sobre el eje del generador un par  $T_e$  que fuerce a la turbina a operar sobre la curva de par óptimo ( $T_t(\lambda_o, \Omega) = T_o$ ), lo cual permite máxima captura de energía y optimiza la cantidad de agua potabilizada. Es decir, se toma como ecuación de salida

$$h_T = T_o(\Omega) - T_e, \quad (19)$$

la cual se quiere forzar a cero. Este objetivo puede plantearse en términos de las corrientes de referencia y del generador

$$h = I_o(\Omega) - I_s = \frac{2T_o(\Omega)}{3\phi p} - \frac{2T_e}{3\phi p}, \quad (20)$$

donde se ha supuesto que el par del generador sincrónico de imanes permanentes conectado al rectificador no controlado es

$$T_e = \frac{3p\phi I_s}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{I_s L_s}{\phi}\right)^2} \cong \frac{3}{2} p\phi I_s \quad (21)$$

Luego

$$h(x, u) = \frac{2}{3} \frac{k \left(\frac{r}{\lambda_0}\right)^3 C_{p0} x_2^2}{\phi p} - \frac{2}{3} \frac{k_m (u - x_1) \frac{x_1}{x_2} \frac{2}{p_m}}{\phi p} + \frac{P_{ed}}{x_2}. \quad (22)$$

Para cumplir con el objetivo preestablecido se propone la aplicación de conceptos de control por modos deslizantes (MD). Obviamente, surge un inconveniente fuerte cuando se pretende aplicar una acción discontinua sobre la frecuencia de excitación del motor. Para sobrellevar esta limitación se propone expandir el sistema y actuar en forma discontinua sobre el estado expandido a través de un algoritmo de MD dinámico (Sira Ramírez, 1992). Así, siendo el modelo de la forma

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{aligned} \quad (23)$$

la acción discontinua se aplica sobre la derivada de la salida

$$\dot{y} = -W \operatorname{sig}(h) \quad (24)$$

es decir, se verifica que

$$\frac{\partial h}{\partial x} f(x, u) + \frac{\partial h}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = -W \operatorname{sig}(h) \quad (25)$$

$$\frac{\partial h}{\partial u} = -\frac{4}{3} \frac{k_m}{p_m \phi p} \frac{x_1}{x_2} \quad (26)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{\partial h}{\partial u}\right)^{-1} \left(\frac{\partial h}{\partial x} f(x, u) + W \operatorname{sig}(h)\right) \quad (27)$$

donde

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \begin{bmatrix} K_I \frac{u-2x_I}{x_2} & K_{II} x_2 - K_I \frac{(u-x_I)x_I}{x_2^2} - \frac{P_{ed}}{x_2^2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$K_I = -\frac{4}{3} \frac{k_m}{p_m \phi p} \quad K_{II} = \frac{4}{3} \frac{k \left(\frac{r}{\lambda_0}\right)^3 C_{p0}}{\phi p}$$

La parte superior de la Fig. 2 esquematiza el control dinámico del par reflejado por la carga.

#### Control del subsistema de electrodiálisis

Aún siendo las variables eléctricas del convertidor rápidas frente a las dominantes de las ecuaciones (16)-(18), nos detenemos en el control del convertidor DC/DC ya que es importante verificar su estabilidad cuando se implementa el control de concentración del electrodiálizador. Garantizada la misma, su dinámica eléctrica ahora puede omitirse frente a la de los estados dominantes. El objetivo de control del sistema de electrodiálisis es regular la concentración de sal en el agua de salida para garantizar su potabilidad, independientemente del punto de operación del sistema y de las perturbaciones por variaciones en la concentración inicial y en el caudal. Esta última puede ser significativa, dado que el caudal se modifica para ajustar el par en el eje del generador a los efectos de mantener el máximo aprovechamiento del recurso eólico con diferentes velocidades del viento. Para alcanzar este objetivo, se actúa sobre las variables eléctricas del subsistema, lo cual permite trabajar con dinámicas rápidas frente a las mecánicas de la bomba o turbina.

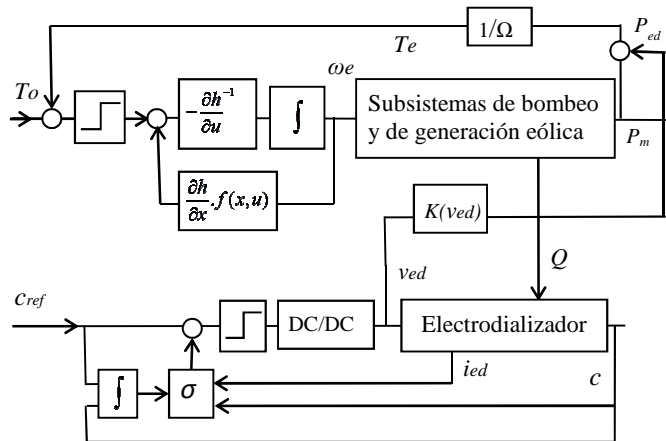


Fig. 2. Control propuesto.

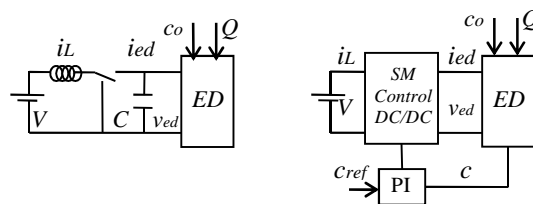


Fig. 3. Esquema del control del electrodiálizador

La Fig.3 muestra un esquema básico del convertidor y electrodiálizador que puede modelarse por

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_{ed} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V}{L} \\ -\frac{i_{ed}(v_{ed}, Q, c, c_o)}{C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -v_{ed} \\ \frac{L}{C} \\ \frac{i_L}{C} \end{bmatrix} u, \quad (29)$$

con  $u \in [0,1]$  la acción de control discontinua que comanda el estado de la llave del convertidor, y  $i_{ed}(v_{ed}, Q, c, c_0)$  la corriente del electrodiálizador que es función no lineal del caudal  $Q$ , de la concentración  $c$  de la solución y tensión aplicada  $v_{ed}$ .

Si bien la variable candidata para controlar la concentración es la tensión  $v_{ed}$  sobre el capacitor  $C$ , cálculos simples muestran que la tensión  $v_{ed}$  no puede ser controlada en forma directa, ya que si bien es una variable de grado relativo uno, no permite la estabilidad de la corriente (dinámica escondida). Por este motivo se plantea el control en términos de un lazo interno de corriente operando en modos deslizando y un lazo externo de concentración. Luego se plantea la superficie de corriente

$$\sigma = i_L - i_{ref} \quad , \quad (30)$$

donde  $i_L$  es la corriente por el inductor del conversor controlada mediante la señal discontinua  $u \in [0,1]$ , e  $i_{ref}$  es la señal de referencia sintetizada por un controlador PI.

Para calcular el rango de tensiones de operación para la acción de control disponible puede hacerse uso de las condiciones de invariancia

$$\sigma = 0; \quad \dot{\sigma} = \dot{i}_L = \frac{V_{ed} u_{eq} - V}{L} = 0, \quad (31)$$

y de la condición necesaria y suficiente que garantiza el régimen deslizando  $u^- = 0 < u_{eq} = V / v_{ed} \leq u^+ = 1$ , siendo  $u_{eq}$  el control equivalente (es decir la señal continua ficticia que garantiza el mismo comportamiento que la acción discontinua). Luego  $0 < V < v_{ed}$  define el rango de tensiones con que puede trabajar el electrodiálizador. Dado que el electrodiálizador presenta un comportamiento no lineal fuerte, es importante verificar que la dinámica escondida (es decir la dinámica de la tensión de entrada del electrodiálizador) sea estable cuando se opera sobre la superficie (20). Con este fin se analiza

$$\dot{v}_{ed} = \frac{-1}{R_{ed}(c)C} v_{ed} + \frac{V}{v_{ed}} \frac{i_{ref}}{C}, \quad (31)$$

donde  $R_{ed}(c)$  es la resistencia del electrodiálizador que depende de la concentración de la solución según ecuaciones (2)-(3) e  $i_{ref}$  es la corriente que circula por la bobina (dado que la dinámica cero debe verificarse una vez establecido el régimen deslizando).

El punto de equilibrio debe verificar

$$V_{ed} = \sqrt{i_{ref} V R_{ed}(c_{ref})}. \quad (32)$$

A los efectos de evaluar la estabilidad para distintas concentraciones de referencia, basta con calcular la derivada de  $\dot{v}_{ed}$  con respecto a  $v_{ed}$ , la cual debe de ser negativa. Efectivamente

$$\frac{d\dot{v}_{ed}}{dv_{ed}} = \frac{-1}{R_{ed}(c_{ref})C} - \frac{V i_{ref}}{(v_{ed})^2 C} < 0. \quad (33)$$

Debe notarse que el punto de equilibrio puede variar significativamente con la concentración de iones en la solución, al igual que también lo hace con el caudal. A los efectos de garantizar el objetivo propuesto la referencia de corriente es fijada a través de un lazo externo de concentración con controlador PI



$$i_{ref} = k_p (c - c_{ref}) + k_i \int (c - c_{ref}) dt \quad (34)$$

Dadas las características no lineales del proceso las ganancias del controlador se pueden calcular para un modelo linealizado del caso peor.

### COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Las figuras de esta sección corresponden a un sistema con una turbina de longitud de palas de 1.6m con potencia de 3.75KW a  $v=12m/s$ , con bomba centrífuga de 3KW, electrodiálizador de área efectiva de  $2.2m^2$ , separación de 5cm entre membranas y una celda.

La Fig. 4 muestra los perfiles de viento y de concentración del agua de entrada empleados en las simulaciones. Se consideran cambios abruptos de estas variables que, si bien difícilmente puedan presentarse, permiten evaluar más fielmente el comportamiento del sistema. La figura 5 muestra los pares y velocidades de los subsistemas de generación eólica y de bombeo. El control propuesto se encarga de que la carga (bombeo más electrodiálizador) refleje sobre el generador el par de referencia óptimo definido para cada velocidad de la turbina. Ante el cambio de velocidad de viento, en la Fig. 5a se observa una diferencia de par que es la que permite que la turbina busque un nuevo equilibrio en velocidad (Fig.5b) con máxima eficiencia para la captura de la energía eólica disponible. En la Fig. 5c se muestran la diferencia entre el par del motor y el par de la bomba, que modifica la velocidad de la bomba (Fig. 5d) buscando el punto de equilibrio que garantiza el balance entre generación y consumo.

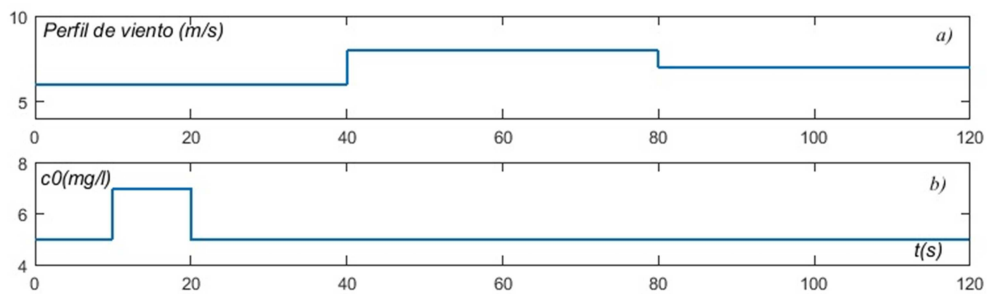


Fig.4. Perfil de viento y concentración de entrada.

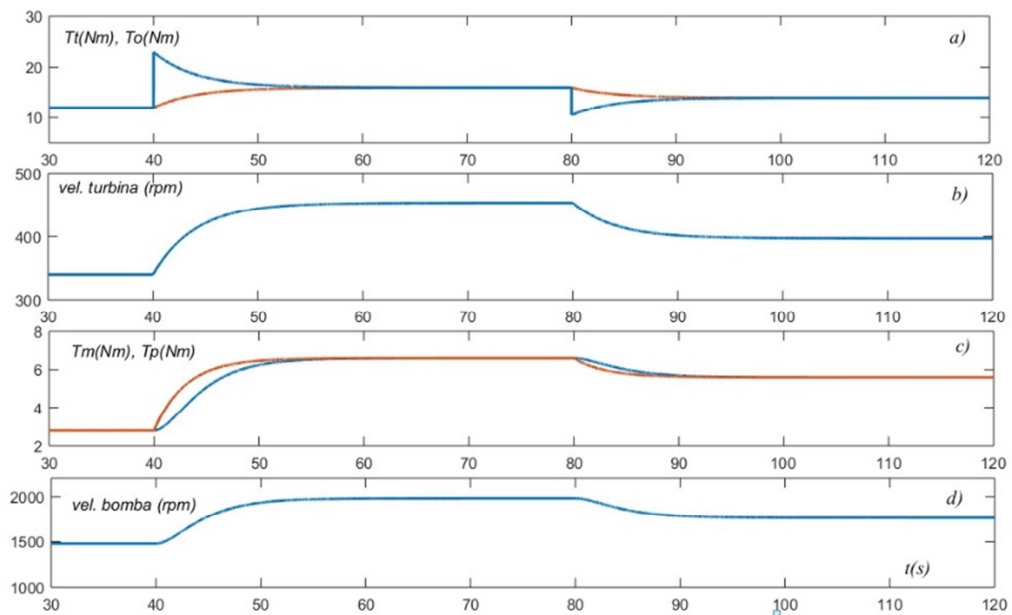


Fig.5. a) Par en la turbina (trazo a puntos) y par reflejado por la carga; b) velocidad de la turbina; c) par del motor (trazo continuo) y de la bomba; velocidad de la bomba.

La Fig. 6 muestra las variables del electrodiálizator: caudal  $Q$  el cual resulta de la evolución de la velocidad de la bomba, la tensión controlada del electrodiálizator  $V_{ed}$  y la concentración de sales del agua de salida. Se observa que mas allá de los cambios de concentración de entrada (Fig. 4b) y de caudal  $Q$  debidos al perfil de viento, el control garantiza el buen comportamiento del sistema, asegurando la concentración deseada de salida (2.8mg/l).

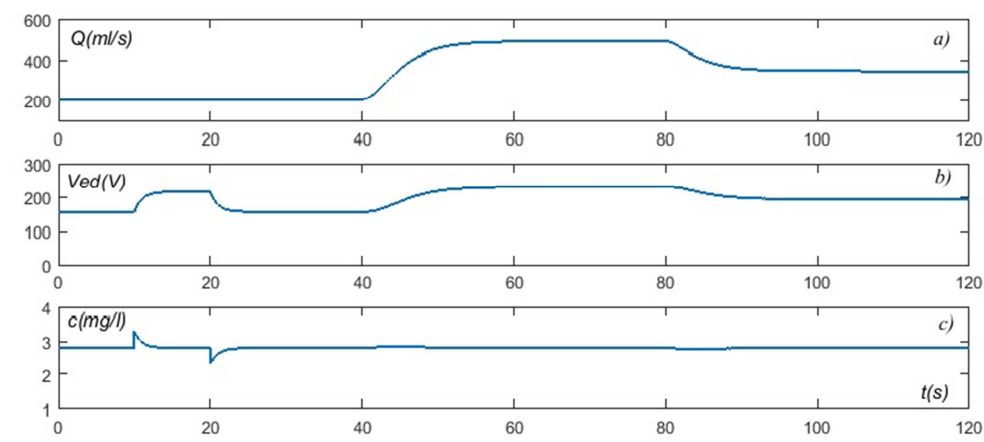


Fig.6. Caudal (a), tensión ( $v_{ed}$ ) en el electrodiálizator y concentración de salida (c).

## CONCLUSIONES

La operación de sistemas de desalación de agua a partir de recursos energéticos renovables resulta esencial para el desarrollo de regiones aisladas donde las redes eléctricas son débiles. En este marco, el trabajo ha evaluado la operación y control de un sistema autónomo de desalación por electrodiálisis alimentado por una turbina eólica. El control propuesto es planteado en el marco de los sistemas de estructura variable y permite garantizar la calidad del agua potabilizada, más allá de la variabilidad del recurso energético, el caudal de entrada y la concentración inicial de sales en el agua. Asimismo, el control complementario del caudal del agua bombeada y de las variables eléctricas del electrodiálizator permiten reflejar un par de carga sobre el generador eólico que optimiza la captura de energía eólica disponible y así el volumen del agua potabilizada.

**Agradecimientos.** Este trabajo fue subsidiado por CICpBA, ANPCyT, CONICET, UNPSJB y UNLP.

## REFERENCIAS

- Al-Karaghoulí A, Kazmerski L (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 24, 343–356
- El-Dessouky H, Ettouney H. (2002). *Fundamentals of Salt Water Desalination*. ELSEVIER. Amsterdam.
- Guolin J, Yang L, Chunjie H. (2009). *Mathematical modeling for desalination by electro-dialysis*, Daqing Petroleum Institute, IEEE, Daqing, China.
- Li C, Goswami Y, Stefanakos E (2013). Solar assisted seawater desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V19. 136-163.
- Palau M. (2009) *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua*. Min. de Sanidad y Política Social.
- Sadrzadeh M, Kaviani A and Mohammadi T. (2007). Mathematical modeling of desalination by electro-dialysis. *Desalination* 206, 538–546.
- Sira Ramirez H. (1992). On the dynamical sliding mode control of nonlinear systems. *International Journal of Control*; 57: 1039–1061.
- Strathmann H. (2004). *Assessment of Electro-dialysis Water Desalination Process Costs*. Technical Report. Universität Stuttgart Department. Institute of Chemical Process Engineering.

Troncoso P, Mantz R, Battaiotto P (2014). Electrodialysis Processes Assisted by Photovoltaic Panels. Concentration Control. IEEE Latin America Transactions.V 12 (5). 864– 870.  
Wood J. y Gifford J. (2014).Continuous Electrodeionization. J. Wiley.

## **ABSTRACT**

The analysis and control of an autonomous water desalination system powered by wind energy is addressed. It consists of the generation subsystem (wind turbine and synchronous generator) and the water potabilization one (electrodialyzer, and centrifugal pump driven with induction motor). Although the system has a structure of multiple inputs and multiple outputs (MIMO), practical considerations allow enable the proposal of a decentralized control. The proposed control, based on concepts of sliding regimes, guarantees two objectives within its range of operation: 1) that the output water concentration is below a reference level beyond the intensity of the wind resource, the flow pumped and the initial concentration of salts; 2) that the desalination process reflects on the generator a load that allows the maximum use of the wind resource.

**Keywords:** wind energy, desalination, electrodialysis, sliding modes.