

CONTROL DE SISTEMAS DE DESALACIÓN POR ELECTRODIÁLISIS COMO CARGAS INTELIGENTES EN MICRO REDES CON ALTA PENETRACIÓN DE GENERACIÓN RENOVABLE

Ricardo J Mantz^{a,1}, Pedro Battaiotto^{a,2}, Roberto D Fernández^{b,3}, Ramiro Peña^{b,4}

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

Laboratorio de Automatización y Control, Facultad de Ingeniería, UNPSJB
Ciudad Universitaria Km 4, 9005 Comodoro Rivadavia.

Tel. 0297-4557890. dfernandez@unpata.edu.ar

Recibido 08/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: Se evalúa la capacidad de un sistema de desalinización de agua para ser operado como una carga inteligente en una micro red en la que se asume alta penetración de generación renovable. Con este fin, el proceso de desalinización es modelado como un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas donde, no sólo se busca controlar la concentración de sales del agua potabilizada, sino también contribuir con el control de variables eléctricas de la micro red a partir de información local de la misma. Se muestra que los procesos de desalinización (electrodializador más subsistema de bombeo) presentan las propiedades necesarias para actuar como cargas inteligentes, favoreciendo la gestión activa de la demanda. Se comentan aspectos del control de balance de potencia y se propone un controlador por modos deslizantes para controlar la salinidad del agua potabilizada.

Palabras clave: energías alternativas, desalinización de agua, micro redes, cargas inteligentes, generación distribuida.

INTRODUCCION

Los sistemas de generación distribuida están obligando a cambiar la forma tradicional de operar las redes eléctricas. Entre otras alternativas se evalúan metodologías en base a conceptos de microredes y redes inteligentes (Guerrero et al. 2013). Las micro redes permiten el flujo bidireccional de energía favoreciendo la integración de las fuentes de generación de origen renovable, el ahorro de energía, la reducción de costos y el incremento de flexibilidad en vistas a una mayor fiabilidad. Entre otros componentes constitutivos, se encuentran los sistemas de generación (particularmente de energías renovables), sistemas de almacenamiento de energía, las cargas inteligentes provistas con técnicas para gestión del consumo, sistemas de monitoreo y control del flujo de potencia que garantizan la operación en conexión a red o en forma aislada. Obviamente este último modo de operación (modo isla) es el que presenta más desafíos desde el punto de vista de la calidad del servicio eléctrico (Momoh, 2012). En términos generales, las micro redes presentan una débil respuesta inercial potenciando las condiciones de inestabilidad. Esto es debido a que, mayoritariamente, los sistemas de generación basados en energías renovables presentan una muy baja o nula inercia mecánica. La falta de esta inercia dificulta el balance de potencia tanto en condiciones normales como frente a fallas. Siendo que estos sistemas de generación se conectan a la micro red a través de convertidores electrónicos, un adecuado control de estos permite emular el comportamiento inercial. El rango de potencia de los convertidores restringe fuertemente el valor máximo de inercia a emular (Muljadi et al., 2012). Además, el balance entre generación y carga, del cual depende la calidad de

¹ Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, UNLP. Investigador Principal CICpBA.

² Profesor Consulto, Facultad de Ingeniería, UNLP.

³ Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, UNPSJB.

⁴ Docente, Facultad de Ingeniería, UNPSJB. Becario Postdoctoral CONICET

potencia de la micro red, es fuertemente afectado por la intermitencia de los recursos renovables, como el fotovoltaico o el eólico, y por su disponibilidad en el momento de mayor demanda. Un caso extremo es el de micro redes con fuerte inserción fotovoltaica y con un porcentaje importante de consumo debido a carga de baterías de autos eléctricos, donde la generación y la demanda están completamente desfasados en tiempo (Liu et al. 2013). Si bien las incorporaciones de dispositivos de almacenamiento atenúan el desbalance, distintos estudios demuestran que los niveles de almacenamiento requeridos pueden ser económicamente inviables en la actualidad.

En este marco se refuerzan los conceptos de gestión activa de la demanda y de cargas inteligentes que pueden contribuir al balance de potencia (Solanki et al., 2017; Yan et al. 2017a, 2017b). La gestión activa de la demanda *GAD* (más conocida por su terminología en inglés Demand Response) consiste en un conjunto de acciones y desarrollos tecnológicos tendientes a incentivar a los consumidores a hacer un uso racional de la demanda energética. Estas acciones corresponden al “corto plazo” y se pueden activar tanto en base a señales representativas de la calidad de potencia de la micro red como por el precio del suministro. Entre otras medidas, la *GAD* incluye el apagado y encendido de grupos lumínicos, ajuste de los niveles de climatización y paradas de procesos de fabricación que no sean críticos. Cuando estas medidas se realizan en forma gradual sobre las cargas no críticas *NCL* (aquellas que pueden soportar variaciones de voltaje en un amplio rango sin perjuicio para los usuarios), se suele hacer referencia a cargas inteligentes *SL* (Akhtar et al. 2015). Una *SL* es una combinación de una carga no crítica (o un grupo de cargas no críticas similares) y una interfaz electrónica de potencia que la desacopla del suministro. De esta forma, el consumo de energía de la carga puede ser controlado en función de su dependencia con la tensión (para cargas estáticas) o de la frecuencia (para cargas con motor). Así, el control conjunto de los sistemas de generación, de los sistemas de almacenamiento y de las cargas inteligentes, aportan flexibilidad a la micro red para garantizar el balance de potencia sin afectar las cargas críticas *CL* (e.d. aquellas que requieren un estricto control de tensión y/o frecuencia) particularmente si corresponden a cargas prioritarias (aquellas cuya conexión debe ser garantizada más allá de posibles fallas).

Las cargas inteligentes también pueden contribuir al amortiguamiento necesario para evitar comportamientos oscilatorios en la micro red, debidos a cargas que operan a potencia constante y que tienen un efecto desestabilizador sobre la red debido a su impedancia incremental negativa. (Meng et al., 2017)

Lo anteriormente comentado refuerza la importancia de clasificar y evaluar distintos tipos de carga que puedan actuar como cargas inteligentes y así contribuir en forma efectiva a la calidad de potencia de la micro red. Distintos autores han evaluado la capacidad de cargas típicas en las redes eléctricas, para ser operadas como *SL*. Entre otros, Luo et al. (2017) consideran sistemas térmicos como *SL*. En Chakravorty (2017) se estudia como cargas estáticas y motores pueden ser operadas en forma inteligente para contribuir al control primario e incluso a la respuesta inercial. En esta línea, el presente trabajo evalúa el control de procesos de purificación del agua por electrodiálisis, en vista de ser operados como cargas inteligentes para contribuir al balance de potencia de la micro red a la cual están conectadas.

SISTEMAS PARA DESALINIZACIÓN DE AGUA POR ELECTRODIÁLISIS EN MICRO REDES

Los avances tecnológicos en sistemas de desalinización de agua y de conversión de energías alternativas están permitiendo reactivar regiones donde abunda el agua salada y sólo se dispone de un acceso débil (o nulo) a la red eléctrica (Li et al., 2013). Las características de los sistemas eléctricos de muchos de estos lugares coinciden con las de las micro redes y podrían ser operadas como tales a los efectos de reducir problemas asociados al desbalance entre la generación y el consumo. Tradicionalmente, las herramientas convencionales para abordar los desbalances de potencia han sido, - durante las horas de exceso de generación: bajar la eficiencia de los sistemas de conversión de energía, cargar los sistemas de almacenamiento, plantear estrategias de coparticipación de generación, disipar potencia, etc.

- cuando la demanda excede la generación: emplear la energía disponible en los sistemas de almacenamiento, desconectar cargas no prioritarias, puesta en marcha de unidades de generación de reserva, etc.

Cada una estas acciones presentan costos económicos que deben ser evaluados para cada micro red.

La opción de *GAD* y en particular del control de cargas inteligentes puede reforzar técnicas de coparticipación de la generación distribuida aportando flexibilidad en la operación de micro redes. En este marco es importante evaluar que cargas pueden operar como *SL*. En esta sección se evalúa un sistema de desalinización como carga inteligente. Se considerarán los dos subsistemas de mayor relevancia: el de electrodiálisis y el de bombeo que alimenta el electrodiálizador (*ED*).

A. Proceso de Electrodiálisis.

En la figura 1a que esquematiza la operación de un electrodiálizador para desalación del agua, puede distinguirse el ánodo *A*, el cátodo *K* y, entre ellos, una serie de membranas entre las cuales circula el agua a desalar y la salmuera (solución con alta concentración de sales). Al aplicar una tensión entre sus electrodos, los cationes con cargas positivas se desplazan hacia el cátodo a través de una membrana con carga negativa *MA* siendo retenidos entre dos membranas (ya que las membranas son selectivas en el sentido que solo dejan pasar un tipo de iones). De la misma forma, los iones con carga negativa se mueven hacia el ánodo a través de la membrana *MA*, siendo retenidos en el agua que circula entre dicho ánodo y esta membrana. A medida que el flujo de agua avanza, los iones van atravesando las membranas y quedando fuera del canal principal. La selectividad direccional de las membranas permite que el agua que se desaliniza quede aislada de la salmuera. A los fines de describir el proceso de desalinización, en la Fig. 1b se muestra un volumen diferencial (h, dx, w) de agua comprendido entre dos membranas. Mientras que el agua circula en la dirección x del dibujo, hay una corriente de iones en la dirección normal a las membranas. Esta corriente hace que la concentración de sales cambie en $dc = c_x - c_{x+dx}$ en el tramo dx . Al integrar dx a lo largo de la longitud l se obtiene la concentración de sales del agua potabilizada. Luego, el balance de masa de iones puede aproximarse por

$$uh \, dc = J_M \, dx = - \frac{\eta}{F} \frac{I}{A_M} \, dx, \quad (1)$$

donde u es el caudal por unidad de área, J_M el flujo de moles, F la constante de Faraday, I la corriente entre membranas (corriente del electrodiálizador), A_M el área efectiva de las membranas de intercambio iónico, η la eficiencia de corriente que puede expresarse en función de la velocidad de fluido como

$$\eta = \alpha \delta u^{1/3} \quad (2)$$

siendo α y δ son parámetros cinemáticos que se ajustan de manera polinómica.

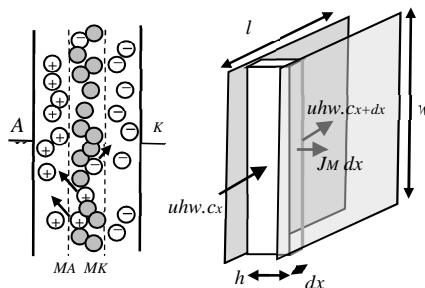


Fig. 1. a) Esquema del proceso de electrodiálisis. b) Elemento diferencial de flujo el modelado del ED
La corriente I queda definida por la relación

$$(3) \quad I = V_e / NR$$

donde V_e es el voltaje aplicado al electrodiálizador, R es la resistencia óhmica no lineal y N es la cantidad de celdas anidadas. La principal componente óhmica del sistema es aportada por la solución líquida, ya que las membranas tienen una muy baja resistencia eléctrica. Así, R se puede expresar en función de la concentración de la solución como

$$R = h / \kappa A_M \quad (4)$$

donde A_M es el área efectiva entre las membranas y $\kappa = \Lambda_M c$ es la conductividad de la solución, c la concentración, Λ_M la conductividad molar (función de los iones considerados). Luego reemplazando en la Eq. (1) se obtiene

$$\frac{-Q^{2/3} h^2 FN}{\beta E A_M^{2/3}} f(c, c_0) = I \quad (5)$$

donde $\beta = \alpha \delta$, $u = Q / A_M$, Q es el caudal y c_0 la concentración inicial cuando $x = 0$ y

$$f(c, c_0) = \int_{c_0}^c \frac{dc}{c(\Lambda_M^0 - Ac^{0.5})} \quad (6)$$

A partir de las ecuaciones previas, en la Fig. 2 se grafica la dependencia de la concentración de salida con la tensión del electrodiálizador y con el caudal. Estas curvas ponen de manifiesto la forma en que la tensión en bornes de entrada puede ser manejada para rechazar perturbaciones en la concentración inicial y variaciones de caudal. (Troncoso et al., 2014)

B. Sistema de Bombeo

El sistema de bombeo juega un papel importante en el sistema de desalinización tanto desde el punto de vista de consumo eléctrico como en el efecto que el caudal tiene sobre la concentración del agua potabilizada. Básicamente consiste en un motor de inducción, la bomba de agua y la electrónica de potencia para su control. Si el motor trabaja a flujo magnético constante, el par T_m y potencia P_m del motor resultan

$$T_m = 3 \frac{P}{2} \phi_m^2 \frac{\omega_{sl} R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2}, \quad (7)$$

$$P_m = 3 \frac{P}{2} \phi_m^2 \frac{\omega_{sl} R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \Omega_b, \quad (8)$$

donde ϕ_m es el flujo magnético en el entrehierro, ω_{sl} la frecuencia de resbalamiento, L_r la inductancia de dispersión, R_r la resistencia de rotor y p el número de pares de polos. Luego, la ecuación dinámica de la bomba resulta

$$\dot{\Omega}_b = (T_m - T_b) / J_T, \quad (9)$$

donde el par de la bomba es función cuadrática de la velocidad de la bomba Ω_b

$$T_b = k_b \Omega_b^2 = k_b \omega_b^2 (2 / p_m)^2, \quad (10)$$

siendo k_b la constante de la bomba y ω_b la frecuencia angular equivalente a la velocidad de la bomba.

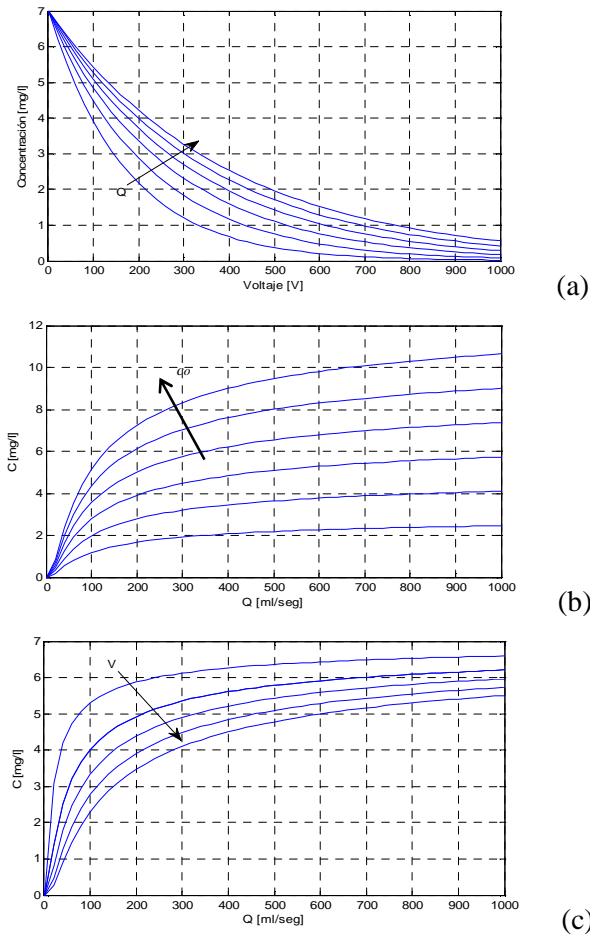


Fig. 2. Características a) c - V_e con Q como parámetro; c - Q del con b) la concentración inicial C_0 ; y c) V_e como parámetros.

C. Potencia total del sistema de desalinización

Luego, la potencia demandada por el sistema de desalinización resulta la correspondiente a la de los dos subsistemas: ED y de bombeo.

$$P_T = P_{ED} + P_b = V_e I + T_m \Omega_b \cdot \quad (11)$$

De igual forma puede definirse el reactivo que presentan ambos subsistemas (e.d. el convertidor del ED y el inversor del motor de inducción)

$$Q_T = Q_{ED} + Q_b \cdot \quad (12)$$

PROPUESTA DE CONTROL DEL ED COMO SL

Usualmente el objetivo de control de un sistema de desalinización por electrodiálisis es la potabilización de un determinado volumen diario de agua, obteniendo una concentración de sales inferior a un nivel de referencia cr independientemente de variaciones en la salinidad inicial del agua, en el caudal de entrada, y en el suministro de energía. En este trabajo, el sistema de desalinización (electrodializador, sistema de bombeo, convertidores de potencia) es operado y controlado para cumplir un segundo objetivo, esencialmente diferente al anterior. El sistema de desalinización es considerado una potencial carga inteligente, incorporando a su objetivo de control el modo de operación “demand response” para disminuir riesgos en la estabilidad de las variables eléctricas de la

micro red a la cual está conectada. Es decir, preservando la calidad del agua desalinizada ($c < c_r$), se pretende regular la potencia eléctrica consumida por el sistema de desalinización de acuerdo con el estado de potencia de la micro red. En este contexto, el sistema de desalinización es visto como un sistema de múltiples entradas y salidas (MIMO) de tres entradas y tres salidas, donde las variables a controlar son:

-Concentración c .

-Potencia consumida P_T . A través de una recta de carga de droop¹ (“droop positivo”) se permiten variaciones del consumo de energía para ayudar al balance entre la generación y la carga (Elrayyaah et al., 2017). La pendiente de esta curva de droop $P-f$ (potencia activa - frecuencia) indica el grado de participación del sistema de electrodiálisis en la gestión activa de cargas de la micro red.

-Potencia reactiva Q_T a la entrada del sistema de desalinización. Tanto el convertidor AC/DC que regula la tensión sobre el electrodiálizador en el AC/AC que controla el sistema de bombeo pueden regular el reactivo en sus terminales de entrada, colaborando así también en la regulación de la tensión de alterna de la micro red. Con el objetivo de definir el grado de participación de la carga al reactivo en la red, la referencia Q_r también puede definirse a partir de una curva de droop de pendiente positiva $Q-V_g$ (potencia reactiva – tensión)

La Fig. 3 muestra el esquema de control propuesto. El mismo corresponde a un control descentralizado con tres lazos de control (con realimentación proporcional de los estados e integral con respecto a los errores). El lazo superior corresponde al control de concentración. Los otros dos al consumo de potencia activa y reactiva del sistema completo.

A los efectos del control descentralizado:

-técnicas de control vectorial en los accionamientos electrónicos permiten desacoplar el control de potencia activa del de potencia reactiva.

-el sistema a lazo abierto presenta un acoplamiento fuerte entre el sistema de bombeo (caudal) y la concentración de salida (c). La bomba se controla a través de su velocidad, dependiendo su caudal del cubo de la misma. A su vez el caudal afecta la concentración como indica la Fig. 2.

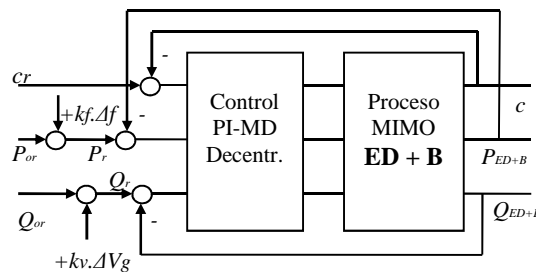


Fig. 3. Control del sistema de desalinización como SL

Dado que el lazo superior de concentración sólo incluye variables eléctricas, su controlador puede diseñarse para presentar una respuesta rápida en comparación con la respuesta dinámica del conjunto motor bomba. Así la velocidad de la bomba (por ende su caudal) es vista como una perturbación lenta, permitiendo desacoplar los lazos. Luego, una acción integral del controlador descentralizado garantiza la concentración en valor c_r más allá del caudal cuasi constante (con respecto a la dinámica del lazo de concentración).

La referencia del lazo intermedio corresponde a la potencia total P_T del sistema de desalinización (motor-bomba + electrodiálizador) y se define a partir de una curva de droop que determina la Gestión Activa de la Demanda. Es decir,

-al caer la frecuencia de red, la referencia de potencia del sistema de desalinización (motor-bomba + electrodiálizador) se reduce de acuerdo a la curva de droop dando lugar a una reducción de la velocidad de giro de la bomba lo cual reduce el caudal de agua enviado al electrodiálizador

¹ Se conserva la terminología droop mas allá de la pendiente positiva.

-a menor caudal por el electrodiador, el nivel de concentración de sales del agua potabilizada se reduce innecesariamente por debajo del valor requerido, lo cual habilita (a través del lazo superior) a reducir la tensión del electrodiador para reducir su potencia, pero siempre garantizando la concentración de salida

Las acciones previas reducen tanto la potencia del sistema de bombeo como la del de desalinización preservando la concentración tolerada a la salida del electrodiador. Dicha reducción de potencia tiende a contribuir al restablecimiento del balance de la red preservando la calidad de potencia para las cargas críticas.

CONTROL DE CONCENTRACIÓN

De acuerdo a lo comentado en la sección previa, en la presente propuesta, el control de potencia total P_T es ejercido a través del convertidor del sistema de bombeo que ve a la potencia del electrodiador como una perturbación blanda (perturbación que contribuye al control de la potencia total). El mismo convertidor también controla el reactivo del sistema de bombeo Q_b (parte de Q_T). El control de este convertidor se realiza a través de técnicas clásicas de control vectorial.

Por otra parte, el convertidor del electrodiador se encarga del control de concentración y contribuye al reactivo total en Q_{ed} .

Debido a que el control del sistema de bombeo puede realizarse por técnicas convencionales, en esta sección centramos nuestra atención en el control del convertidor del electrodiador, es decir de la concentración c y de Q_{ed} . Este lazo debe garantizar la calidad del agua mas allá de los cambios de caudal que se resulten de los requerimientos para el balance de potencia. La acción sobre el electrodiador se ejerce a través de un convertidor AC-DC (Fig. 4) que responde a las siguientes ecuaciones

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C \frac{dv_e}{dt} = -i_c - i_e(v_e) \quad (14)$$

donde v_a, v_b, v_c son las tensiones de la red y las tensiones v_{a1}, v_{b1}, v_{c1} quedan establecidas a partir del estado de las llaves

$$\begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} = \frac{v_e}{6} \begin{bmatrix} 2u_1 - u_2 - u_3 \\ 2u_2 - u_1 - u_3 \\ 2u_3 - u_1 - u_2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

con $[u_1 \ u_2 \ u_3]^T = [sw_1 - sw_4 \ sw_2 - sw_5 \ sw_3 - sw_6]^T$. Así, mientras los estados de las llaves sw_i pueden tomar los valores 0 (llave abierta) y 1 (llave cerrada), las señales u_i puede tomar valores 1 y -1 lo cual es más conveniente a los fines del análisis. Haciendo uso de las transformaciones del apéndice, las ecuaciones dinámicas de las corrientes en un marco de referencia dq rotando a la frecuencia de red ω_e son

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L} i_d + \frac{1}{L} v_d + \omega_e i_q - \frac{v_{e_d}}{2L} u_d \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L} i_q + \frac{1}{L} v_q - \omega_e i_d - \frac{v_{e_d}}{2L} u_q \end{aligned} \quad (16)$$

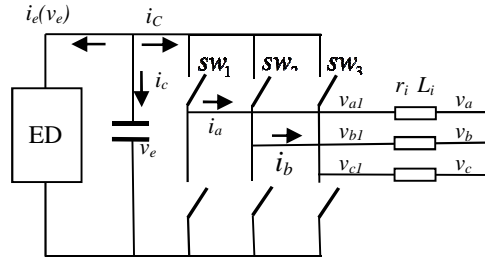


Fig. 4. Detalle del electrolizador y convertidor de control

Se proponen las siguientes superficies de control para el control del convertidor AC/DC:

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = S = \begin{bmatrix} c_r - k_e i_e(v_e) - k_d i_d - k_q q \\ I_q^{ref}(t) - i_q \end{bmatrix} \quad (17)$$

El grado relativo 1 de las funciones de conmutación s_i es condición necesaria para alcanzar el modo deslizante sobre las superficies $s_i=0$. La superficie $s_1=0$ tiene por objetivo que la concentración de sales en el agua potabilizada converja a la referencia c_r . La nueva variable

$$q = \int (c_r - c(v_e, Q, c_0)) dt \quad (18)$$

es incluida en la superficie s_1 para alcanzar error de estado estacionario nulo más allá del valor del caudal Q que interviene en la *GAD*. La selección de las constantes de realimentación k_i puede hacerse para asignar la dinámica de lazo cerrado (Edwards, 1998) bajo la suposición de una dinámica rápida entre i_e y v_e . El régimen sobre $s_2=0$ impone que el convertidor opere con factor de potencia unitario. La potencia P_e es controlada junto con P_b para garantizar la potencia P_T impuesta por el droop por el convertidor AC/AC. Las superficies de control pueden reescribirse como

$$S_{dq} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_d = I_d^{ref}(t) - i_d \\ s_q = I_q^{ref}(t) - i_q \end{bmatrix}, \quad (19)$$

donde

$$\begin{cases} I_d^{ref}(t) = (c_r - k_e i_e(v_e) - k_q q) / k_d \\ I_q^{ref} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

A partir de este cambio, el problema del modo alcance (MA) queda en términos de alcanzar dos superficies $S_{dq}=0$ para las corrientes i_d e i_q , donde la referencia para i_d se obtiene a partir de un lazo externo del control de concentración. En términos de s_d y s_q , la conmutación que garantiza el MA es un problema ya resuelto en la literatura (Utkin, 1999) que se reduce a proponer la siguiente estrategia de conmutación:

$$u = -sig(S_{abc}) = -[sig(s_a) \quad sig(s_b) \quad sig(s_c)]^T \quad (21)$$

siendo

$$S_{abc} = \frac{6L^2}{v_e^2} D^T S_{dq}, \quad (22)$$

y D definido en el Apéndice. Esta estrategia de conmutación garantiza el MA en la región del plano de estados que verifica

$$\max(|F_a|, |F_b|, |F_c|) \leq \frac{v_e^2}{9L^2} \quad (23)$$

con

$$\begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} = D^T F_{dq} = D^T \begin{bmatrix} \frac{dI_d^{ref}}{dt} - \frac{R}{L} i_d + \frac{v_d}{L} + \omega i_q \\ \frac{dI_q^{ref}}{dt} - \frac{R}{L} i_q + \frac{v_q}{L} + \omega i_d \end{bmatrix} \quad (24)$$

La ec. (23) pone de manifiesto la conveniencia de elegir grande la relación v_e/L para ampliar la región de atracción.

Los estados sw_i de las llaves se obtienen a partir de la transformación de las señales u_i :

$$\begin{aligned} sw_1 &= \frac{1+u_1}{2}, & sw_2 &= \frac{1+u_2}{2}, & sw_3 &= \frac{1+u_3}{2} \\ sw_4 &= 1-sw_1, & sw_5 &= 1-sw_2, & sw_6 &= 1-sw_3 \end{aligned} \quad (25)$$

La Fig. 5 esquematiza el lazo de control de concentración incluyendo la conversión dq y la superficie de control propuesta. El lazo de control de potencia activa (no indicado en la figura) afecta el caudal de entrada al electrolizador, teniendo dos efectos: por una parte, el lazo de concentración reacciona al cambio de caudal que ve como perturbación y por otra parte modifica la potencia consumida por el ED, potencia que sumada a la del subsistema MI+Bomba es controlada por el lazo de control de potencia.

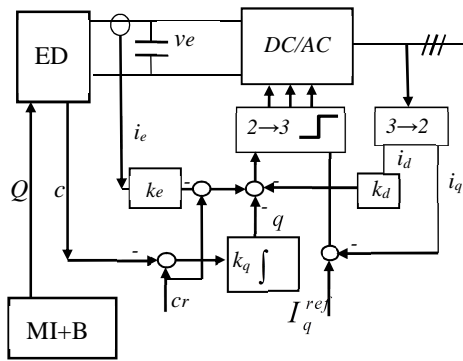
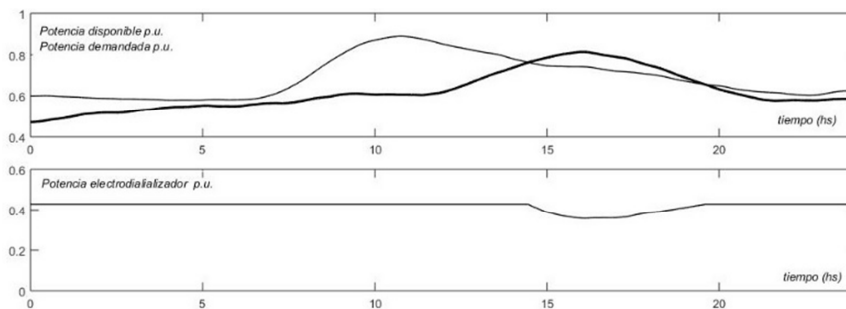


Fig. 5. Lazo de concentración del controlador MIMO

La figura 6 muestra los beneficios de operar el sistema de desalinización como *SL*. En la parte a) de la figura puede ver en trazo fino el perfil de potencia disponible en una micro-red (generación convencional de base, de energía eólica y solar) y en trazo grueso la demanda, observándose que entre las 14.45 y 19.45 horas la demanda supera potencia disponible. La parte b) de la figura muestra la potencia consumida por el sistema de desalinización operando como *SL*, garantizando que en ningún momento la potencia demandada supere la energía disponible (Fig. 6c). Por último, se observa en la parte inferior de la figura que la concentración del agua potabilizada no es afectada por la reducción del consumo de potencia.



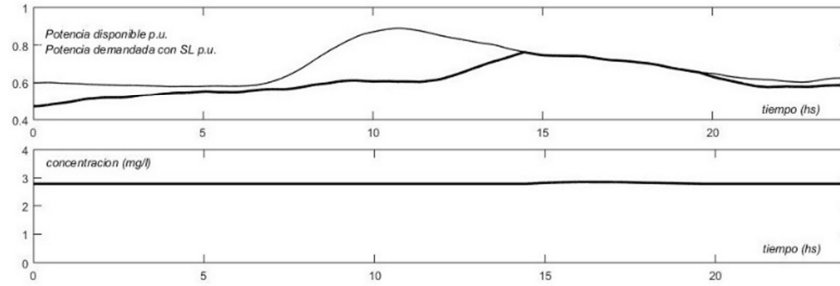


Fig. 6. a) Potencia disponible y demandada. b) Potencia en el ED operando como SL. c) Potencia disponible y demandada con el ED operando como SL. d) Concentración del agua potabilizada.

CONCLUSIONES

La asistencia de procesos de desalinización con energías alternativas está permitiendo el desarrollo de regiones aisladas donde el suministro de energía eléctrica es inexistente o se realiza a través de redes débiles. Suelen conformar micro redes donde los desbalances de potencia pueden generar problemas de calidad del suministro y afectar cargas críticas. En este contexto, la operación de los sistemas de desalinización para Gestión Activa de la Demanda, particularmente empleando conceptos de cargas inteligentes, puede contribuir a la operación estable de la micro red. El presente trabajo evalúa la potencialidad de los procesos de electrodiálisis para operar como cargas inteligentes. Usualmente, el objetivo de control de los sistemas de desalinización se ha centrado exclusivamente en el control de concentración de sales. En este trabajo se demuestra que el proceso de desalinización puede ser operado no solo con este objetivo sino también para contribuir al balance de potencia en una micro red, sin afectar la concentración de sales del agua potabilizada. Esto se alcanza a partir del accionar conjunto sobre la tensión y el caudal en el electrodiálizador.

Apéndice

Las transformaciones para pasar de variables genéricas x_i trifásicas al marco de referencia dq e inversa son:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = M_{\alpha\beta \rightarrow dq} M_{abc \rightarrow \alpha\beta} \begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \end{bmatrix}^T$$

$$M_{\alpha\beta \rightarrow dq} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\text{sen}\phi \\ \text{sen}\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad M_{abc \rightarrow \alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$D = \frac{v_e}{2L} M_{\alpha\beta \rightarrow dq} M_{abc \rightarrow \alpha\beta}$$

$$\begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \end{bmatrix}^T = M_{abc \rightarrow \alpha\beta}^T M_{\alpha\beta \rightarrow dq}^T \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$$

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

REFERENCIAS

- Akhtar Z.; Chaudhuri B.; Ron Hui S (2015). Primary Frequency Control Contribution from Smart Loads Using Reactive Compensation. *IEEE Trans on Smart Grid*. V 6(5). 2356 – 2365.
- Chakravorty D, Chaudhuri B, Ron Hui SY (2017). Rapid Frequency Response from Smart Loads in Great Britain Power System. *IEEE Trans on Smart Grid*. V 8 (5), 2160- 2169.
- Edwards C. and Spurgeon S. (1998). *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. Ed: CRC. London.

- Elrayyah A, Cingoz F, Sozer Y (2017). Smart Loads Management Using Droop-Based Control in Integrated Microgrid Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. V 5(3), 2142-2153.
- Guerrero J, Chandorkar M, Lee TL, Loh P (2013). Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control. *IEEE Trans on Industrial Electronics*. V 60 (4), 1254-1262.
- Li C, Goswami Y, Stefanakos E (2013). Solar assisted seawater desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V19. 136-163.
- Liu H, Hu Z, Song Y, Lin J. (2013). Decentralized Vehicle-to-Grid Control for Primary Frequency Regulation Considering- Charging Demands. *IEEE Trans on Power Systems*. V 28 (3). 3480 – 3489.
- Luo X; Lee C; Man Ng W; Yan S; Chaudhuri B; Ron Hui S (2017). Use of Adaptive Thermal Storage System as Smart Load for Voltage Control and Demand Response. *IEEE Trans on Smart Grid*. V 8 (3). 1231 – 1241.
- Meng L, Shafiee Q, Trecate G F, Karimi H, Fulwani D, Lu X, Guerrero J. (2017). Review on Control of DC Microgrids and Multiple Microgrid Clusters. *IEEE Journal of emerging and Selected Topics in Power Electronics*. V 5 (3). 928-948.
- Momoh J. (2012). Smart Grid. Fundamentals of Design and Analysis. IEEE by J. Wiley & Sons. Hoboken, N. Jersey.
- Muljadi E, Gevorgian V, Singh M, Santoso S. (2012). Understanding Inertial and Frequency Response of Wind Power Plants. *IEEE Power Electr. and Machines in Wind Applications*. Denver, July 16-18, 2012. 1 – 8.
- Solanki BV; Raghurajan A; Bhattacharya K; Cañizares C (2017). Including Smart Loads for Optimal Demand Response in Integrated Energy Management Systems for Isolated Microgrids. *IEEE Trans. on Smart Grid*. V 8(4). 1739 – 1748.
- Troncoso P, Mantz R, Battaiotto P (2014). Electrodialysis Processes Assisted by Photovoltaic Panels. Concentration Control. *IEEE Latin America Transactions*. V 12 (5). 864 – 870.
- Utkin V.Y. (1999). *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, Taylor and Francis; London.
- Yan S., Tan S, Lee C, Chaudhuri B, Ron Hui S (2017). Use of Smart Loads for Power Quality Improvement. *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 5 (1). 504 – 512.
- Yan S; Wang M; Chen J; Hui S Y (2017). Smart Loads for Improving the FRT Capability of Fixed-Speed Wind Generators in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. V PP, Issue: 99.

ABSTRACT

The capability of a electrodialysis water desalination system to be operated as an smart load in a micro grid, in which high penetration of renewable generation is assumed, is evaluated. To this end, the desalination process is modelled as a multiple input - multiple outputs system where, not only concentration is controlled but also local electric variables of the microgrid. It is shown that the desalination processes (electro dialyzer plus pumping subsystems) have the necessary properties to act as smart loads, favouring the active demand response.

Aspects of the active power balance and reactive power control are also discussed. Finally, a sliding mode control is proposed for the water salinity concentration.

Keywords: distributed generation, renewable energies, micro grids, water desalination, smart loads.