

ESTABILIZACIÓN MEDIANTE ESTRATEGIA DE PROYECCIÓN MÍNIMA DE LA ASISTENCIA DE RED DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN RENOVABLE DE H₂*

García Clúa, José G.^(1,*), Mantz, Ricardo J.⁽¹⁾, De Battista, Hernán⁽¹⁾ y Gallegos, Norma G.⁽²⁾

⁽¹⁾ LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP, 1 y 47, CC 91 (1900), La Plata, Argentina.

⁽²⁾ CINDECA - CCT - CONICET, 47 N°257 (1900), La Plata, Argentina.

Calle 48 y 116, CC 91 (1900), La Plata, Argentina. E-mail: jose.garciaclua@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: sistemas conmutados, estabilización, proyección mínima, energía renovable, H₂.

INTRODUCCIÓN

La electrólisis del agua generada a partir de fuentes energéticas renovables hace del H₂ así producido una alternativa sustentable a los combustibles fósiles [1]. Los sistemas de generación renovable de H₂ (SGRH's) se pueden clasificar según el tipo de integración interna de sus componentes principales y la dependencia externa con la red eléctrica [2]. Este trabajo considera el SGRH eólico esquematizado en la Fig.1, el cual implementa una estructura de acoplamiento DC que incluye la conexión a red. El electrolizador se acopla directamente al bus DC, mientras que el generador eólico lo hace a través de un rectificador a diodos [3]. Las principales ventajas de esta estructura simple y robusta son el bajo mantenimiento y costos de operación de la electrónica. La principal desventaja es la falta de controlabilidad del rectificador. Esta circunstancia vuelve oportuna la presencia de la red eléctrica, cuya asistencia puede compensar tal ausencia de control. Asimismo un intercambio adecuado de potencia con la red puede mitigar los efectos negativos de la variabilidad de la energía eólica en la calidad de potencia suministrada al electrolizador.

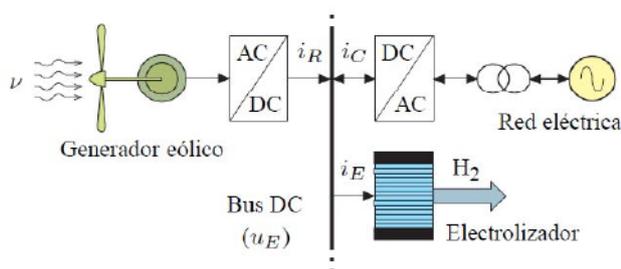


Figura 1. SGRH eólico asistido por red.

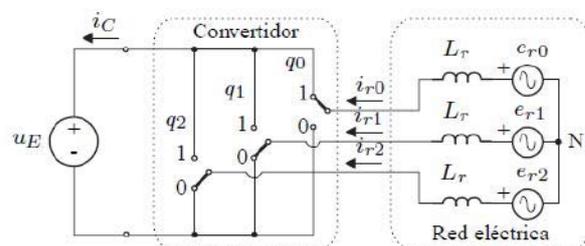


Figura 2. Circuito simplificado de la asistencia de red.

Una estrategia de asistencia de red de particular interés es aquella que maximiza la producción de H₂ fijando la corriente del electrolizador (i_E) en su valor nominal. Esta condición implica que la tensión del bus se mantenga constante según la característica eléctrica i_E-u_E propia del electrolizador como consecuencia del acoplamiento directo de éste. La corriente i_C que debe aportar la red se controla mediante el convertidor que la acopla al bus DC. En este trabajo dicho control se plantea como un problema de estabilización del sistema conmutado que describe la dinámica del convertidor [4]. El diseño y análisis de la estrategia de estabilización propuesta se basa en la aplicación del método de la Función Común de Lyapunov [5] al sistema conmutado que se describe a continuación.

MÉTODOS: I)- MODELO DE ASISTENCIA DE RED

El convertidor del SGRH eólico que implementa la asistencia de red se puede modelizar con tres llaves selectoras ideales representadas en el circuito eléctrico de la Fig.2 [6]. Por su parte la red eléctrica se modeliza con un sistema sinusoidal trifásico en conexión estrella.

* Artículo publicado en las Actas del XV RPIC [7];

**JTP-DE del Dpto. de Ingeniería Química.

Cada fase $k \in \{0, 1, 2\}$, compuesta por un generador e_{rk} de tensión pico \hat{E}_r y frecuencia angular ω_r en serie con una inductancia L_r , entrega una corriente i_{rk} . La carga vista a la salida del convertidor se representa con una fuente de tensión de valor u_E .

Modelo en el marco de coordenadas de fase

La posición de la llave selectora de la rama k se comanda mediante la señal de conmutación $q_k \in \{0, 1\}$ indicada en la Fig.2. Se observa que para el valor $q_k = 1$ la llave conecta la fase k al terminal (+) de la salida, mientras que para $q_k = 0$ la misma queda conectada al terminal (-). La combinación de posiciones de las tres llaves se asocia a un estado discreto que toma valores según la siguiente conversión binaria a decimal:

$$q = 2^2 q_2 + 2^1 q_1 + 2^0 q_0, \quad (1)$$

es decir que $q \in \{0, 1, \dots, 7\}$. En la Fig.2 se representa la combinación correspondiente a $q = 1$. Las siete combinaciones restantes se corresponden con otras tantas variantes de estructura circuital. Aplicando las leyes de Kirchhoff a tales variantes se obtienen las siguientes dinámicas continuas asociadas a cada valor de q [4]:

$$\frac{di_{r\{k\}}}{dt} = \frac{1}{L_r} e_{r\{k\}} - \frac{2}{3L_r} u_E M q_{\{k\}}, \quad (2)$$

donde $i_{r\{k\}} = [i_{r0} \ i_{r1} \ i_{r2}]^T$ es el vector de estados continuos; $e_{r\{k\}} = [e_{r0} \ e_{r1} \ e_{r2}]^T$ es el vector de entradas continuas; $q_{\{k\}} = [q_0 \ q_1 \ q_2]^T$ es la representación binaria del estado discreto q ; y

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

La corriente del convertidor i_C suministrada a la fuente de tensión u_E se expresa en función de las variables trifásicas como sigue:

$$i_C = q_{\{k\}}^T i_{r\{k\}}. \quad (4)$$

Modelo en el marco de coordenadas d-q

Para los fines del control resulta más conveniente representar las variables trifásicas en un marco de referencia rotante a la frecuencia de red mediante coordenadas en cuadratura d-q. Esto se realiza aplicando la siguiente matriz de transformación:

$$A_{dq}^k = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta) & \cos(\theta) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde $\theta = \omega_r t$. Dicha matriz y su traspuesta satisfacen las siguientes propiedades:

$$A_{dq}^k (A_{dq}^k)^T = \frac{2}{3} I_2, \quad (A_{dq}^k)^T A_{dq}^k = \left(\frac{2}{3}\right)^2 M, \quad (6),(7)$$

donde I_2 es la matriz identidad de 2×2 . La sustitución de (7) en las dinámicas (2) y la sustitución de (6) en la derivada de la transformación del vector de estados

$$i_{\{dq\}} = [i_d \ i_q]^T = A_{dq}^k i_{\{k\}} \quad (8)$$

devuelve la dinámica del convertidor en el marco d-q

$$\frac{di_{\{dq\}}}{dt} = A_\omega i_{\{dq\}} + \frac{1}{L_r} (e_{\{dq\}} - u_E q_{\{dq\}}), \quad (9)$$

donde $e_{\{dq\}} = [e_d \ e_q]^T = A_{dq}^k e_{r\{k\}}$ es el vector de entradas transformado; $q_{\{dq\}} = [q_d \ q_q]^T = A_{dq}^k q_{\{k\}}$ es el vector transformado asociado a q ; y

$$A_\omega = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Las siguientes son las potencias activa y reactiva de red obtenidas a partir de las coordenadas d-q:

$$p_c = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q), \quad q_c = \frac{3}{2}(e_d i_q - e_q i_d). \quad (11),(12)$$

II)- CONTROL DE CORRIENTES DE RED

En la Fig.3 se presenta un esquema de control que regula la corriente del electrolizador en su valor nominal (I_E^N) con independencia de las turbulencias del viento que afectan directamente a i_R . El mismo consta de dos lazos de realimentación en configuración cascada. El controlador de lazo externo (C_E) sigue la referencia I_E^N y su salida i_{dq}^* se pasa como referencia del controlador del lazo interno (C_I), el cual regula las corrientes de red mediante una estrategia de conmutación adecuada del convertidor AC/DC. Para el diseño de ambos controladores se tienen en cuenta escalas de tiempo diferenciadas exhibidas por la dinámica del SGRH. La escala lenta que afecta a C_E se asocia a la dinámica del bus DC debido a su alta capacidad de filtrado de fluctuaciones por desbalances de potencia. La escala rápida que afecta a C_I se asocia a la dinámica de las corrientes de red (9) debido a la baja impedancia $\omega_r L_r$ propia de redes fuertes.

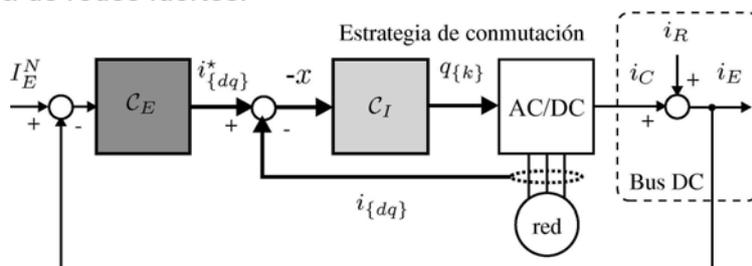


Figura 3. Esquema de control del SGRH asistido por red.

La síntesis de C_E fue tratada en [3] con herramientas de teoría de control puramente continuo. En cambio, en el presente trabajo, la síntesis de C_I se trata con herramientas de análisis de naturaleza híbrida considerando la interacción de estados continuos y discretos involucrados en el siguiente sistema afín conmutado:

$$\dot{x} = f_q(x, \theta) = A_\omega x + b_q(\theta), \quad (13)$$

donde

$$b_q(\theta) = A_\omega i_{dq}^* + \frac{1}{L} e\{dq\} - \frac{1}{L} u_E q_{\{dq\}}. \quad (14)$$

Tal sistema se obtiene a partir de la dinámica (9) haciendo el cambio de variable

$$x = i_{\{dq\}} - i_{\{dq\}}^*, \quad (15)$$

donde $i_{\{dq\}}^*$ es el valor deseado, el cual se considera prácticamente constante por depender de la escala lenta. Por consiguiente el objetivo de regulación de C_I implica la estabilización de (13). Es decir que la estrategia de conmutación debe satisfacer el estado estacionario $x^*=0$. Éste no puede alcanzarse con ninguno de los estados discretos q de (13) debido a que sus puntos de equilibrio:

$$f_q(x_q^*, \theta) = 0 \Leftrightarrow x_q^* = A_\omega^{-1} b_q(\theta), \quad (16)$$

dependen del parámetro θ variante en el tiempo y por lo general no son nulos. Significa que la conmutación entre los subsistemas lineales es una condición necesaria para alcanzar y permanecer en un entorno de x^* , el cual se llama "equilibrio conmutado". Para más detalles sobre este pseudo-equilibrio dinámico y cómo puede analizarse mediante inclusiones diferenciales de Filippov, ver trabajo completo [7]

Estabilización mediante proyección mínima

Para la estabilización del sistema conmutado (13) se propone la siguiente lógica de conmutación:

$$q^* = \arg \left\{ \min_{q \in \mathcal{Q}} x^T f_q(x, \theta) \right\}, \quad (17)$$

la cual se conoce como estrategia de proyección mínima o *Min-Projection* [8]. En efecto, para cada par (x, θ) se selecciona un valor q^* del estado discreto q tal que la proyección del campo f_{q^*} sobre x precisamente se minimice. Reemplazando (13) en (17) se tiene:

$$q^* = \arg \left\{ \min_{q \in \mathcal{Q}} x^T (A_\omega x + b_q(\theta)) \right\}, \quad (18)$$

El problema de minimización se resuelve analizando el término de (18) dependiente de q . Esto es:

$$\min_{q \in \mathcal{Q}} \{x^T b_q(\theta)\} = \min_{q \in \mathcal{Q}} \left\{ -\frac{1}{L_r} u_E x^T q_{\{dq\}} \right\}. \quad (19)$$

A continuación se desarrolla el argumento de (19) para determinar la negatividad del producto escalar, por lo que se dejan de lado los factores positivos:

$$-x^T q_{\{dq\}} = q_{\{k\}}^T (A_{dq}^k)^T (-x) = \sum_{k=0}^2 q_k g_k(x, \theta). \quad (20)$$

Se observa que la aparición de cada término escalar

$$g_k(x, \theta) = \frac{2}{3} x_2 \sin\left(\theta - \frac{2k\pi}{3}\right) - \frac{2}{3} x_1 \cos\left(\theta - \frac{2k\pi}{3}\right). \quad (21)$$

de la sumatoria se comanda con la señal binaria q_k correspondiente y que su signo depende del par (x, θ) . Por consiguiente el mínimo de (20) se consigue con la combinación $q_{\{k\}}^*$ que adiciona los términos g_k únicamente cuando son negativos. Es decir que para todo k se debe satisfacer:

$$g_k(x, \theta) < 0 \Rightarrow q_k^* = 1, \quad g_k(x, \theta) \geq 0 \Rightarrow q_k^* = 0. \quad (22), (23)$$

Las condiciones de conmutación (22) y (23) se pueden expresar con la función signo matricial:

$$\text{sign}(g_{\{k\}}) = [\text{sign}(g_0) \quad \text{sign}(g_1) \quad \text{sign}(g_2)]^T. \quad (24)$$

de manera de obtener la dependencia explícita con los estados continuos del vector de conmutación:

$$q_{\{k\}}^* = \left[\frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \right]^T - \frac{1}{2} \text{sign} \left\{ (A_{dq}^k)^T (-x) \right\}. \quad (25)$$

Finalmente el estado discreto escalar q^* que resuelve el problema de minimización (18) se obtiene reemplazando el vector (25) en (1).

Estabilidad de la ley de conmutación q^*

Sea la función cuadrática:
$$V(x) = \frac{1}{2} x^T x, \quad (26)$$

se demuestra que la estrategia *Min-Projection* minimiza \dot{V} sustituyendo (17) en:

$$\dot{V} = \dot{V}_q = x^T f_q(x, \theta) = \min_{q \in \mathcal{Q}} \{ \dot{V}_q \}. \quad (27)$$

Sin embargo, la minimización de la derivada de V no garantiza su negatividad para todo $x \in \text{Dom}(q^*)$. Tal propiedad es la que debe satisfacer V para que sea candidata a Función Común de Lyapunov (FCL) de un sistema conmutado estable [5]. En particular la estabilidad exponencial del sistema (13) bajo la ley de conmutación (17) debe satisfacer:

$$x^T (A_\omega x + b_q(\theta)) \leq -c x^T x \quad \forall x \in \text{Dom}(q^*), \quad (28)$$

donde c es una constante positiva. Sustituyendo (14) en (28) y reescribiendo en términos del vector \bar{v} se obtiene:

$$x^T \left(\underbrace{cx + A_\omega \bar{v}_{\{dq\}} + \frac{1}{L_r} e_{\{dq\}} - \frac{1}{L_r} u_E q_{\{dq\}}}_{\bar{v}} \right) \leq 0. \quad (29)$$

La condición (29) se interpreta geoméricamente en el plano x_1-x_2 de la Fig.4.

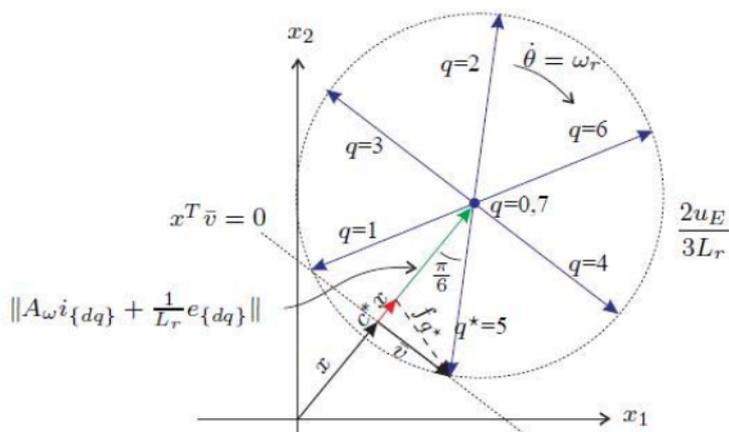


Figura 4. Interpretación geométrica de estabilidad.

Allí se grafica \bar{v} como resultante de los vectores que lo componen. El vector que corresponde al primer término de la suma dada en (29) es siempre colineal con x . El que corresponde a la suma del segundo y tercer término se hace colineal para considerar la combinación de $i_{\{dq\}}$ y $e_{\{dq\}}$ más desfavorable. Finalmente el vector que proviene del término discreto admite la siguiente representación fasorial en función de q_k :

$$-\frac{1}{L_r} u_E i_{\{dq\}} \equiv \frac{2}{3L_r} u_E \sum_{k=0}^2 q_k e^{-j(\theta - 2\pi k/3 - \pi)}$$
 (30)

En la Fig.4 se representa la posición relativa de los fasores (30) en función de q . Nótese que los fasores correspondientes a $q = 0$ y $q = 7$ tienen módulo nulo, mientras que los restantes se inscriben en una circunferencia de radio $2u_E/3L_r$ y giran en sentido horario a velocidad $\dot{\theta} = \omega$. Para el instante $t = 0$ considerado θ es tal que el mínimo $x^T \bar{v}$ es cero, ya sea por selección del fasor ' $q = 1$ ' ó ' $q = 5$ '. Obsérvese que el triángulo rectángulo formado con este último fasor implica la siguiente igualdad:

$$c^* \|x\| + \left\| A_{\sigma} i_{\{dq\}} + \frac{1}{L_r} e_{\{dq\}} \right\| = \frac{2}{3L_r} u_E \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)$$
 (31)

donde c^* es la cota superior de c . Aplicando (31) a la desigualdad $0 < c < c^*$ se llega a la condición:

$$\left(i_d - \frac{e_q}{\omega_r L_r}\right)^2 + \left(i_q + \frac{e_d}{\omega_r L_r}\right)^2 < \left(\frac{u_E}{\omega_r L_r \sqrt{3}}\right)^2$$
 (32)

la cual indica el interior de una circunferencia en el plano $d-q$ como región de operación del convertidor donde el control propuesto es exponencialmente estable. Un caso límite de dicha estabilidad se corrobora en la Fig.4, donde x representa un punto $i_{\{dq\}}$ cercano a la frontera de la región (32). Obsérvese que a medida que $i_{\{dq\}}$ se aproxima a la frontera siempre existe un $c > 0$, por más pequeño que sea, tal que la dirección del campo f_q reorienta la trayectoria $x(t)$ hacia el origen.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Esta sección está orientada a la verificación de las características de estabilidad del controlador C_1 propuesto mediante simulación numérica de un SGRH asistido por red. Éste consta de una turbina eólica de 100 kW, un electrolizador alcalino de corriente nominal $I_E^N = 200$ A y potencia nominal $P_E^N = 60$ kW, y un convertidor de red de igual potencia que el anterior. Se considera una condición de operación crítica por la cual el SGRH requiere máxima asistencia de red para mantener los valores nominales de generación de H_2 . En tal caso la referencia del control debe ser tal que $p_C = P_E^N$ y $q_C = 0$. Dados los parámetros $u_E = 300$ V, $e_{\{dq\}} = [50 \ 0]^T$ V y $\omega_r L_r = 0,2 \ \Omega$, el valor deseado que resulta de (11) y verifica (31) es:

$$\mathbf{i}_{\{dq\}}^* = [800 \ 0]^T \text{ A.} \quad (34)$$

La Fig.6 muestra en el plano d-q un conjunto de trayectorias de estados del sistema controlado mediante la estrategia de proyección mínima. Tales trayectorias permiten verificar la estabilidad asintótica del equilibrio conmutado $\mathbf{i}_{\{dq\}}^*$. En trazo grueso se destaca una trayectoria que ilustra la situación crítica de estabilidad analizada en (31) haciendo $c^*=0$. La evolución temporal de dicha trayectoria se presenta en la Fig.7. Allí se observa cómo transcurrido un tiempo finito del orden del período $2\pi/\omega_r$ las corrientes de red alcanzan y se mantienen en el valor deseado (34).

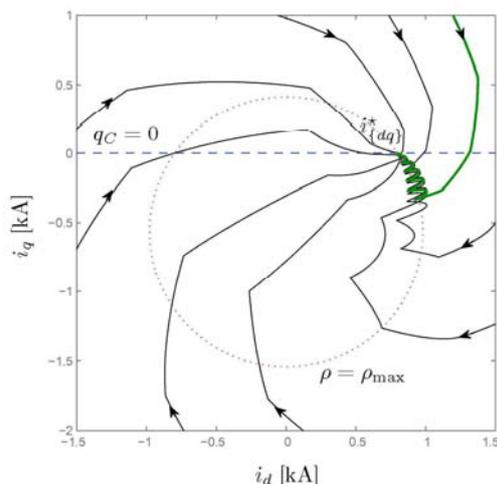


Figura 6. Trayectorias de corrientes de red.

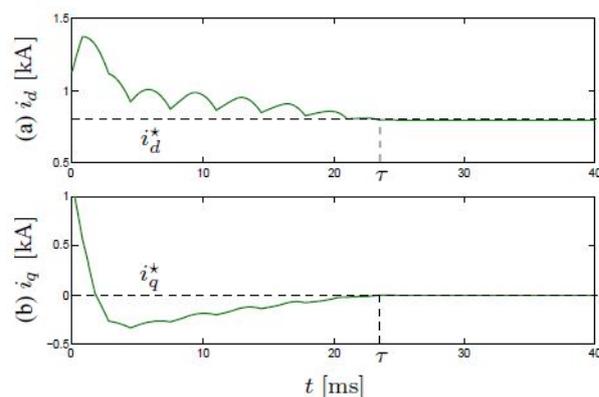


Figura 7. Respuesta temporal de trayectoria crítica.

CONCLUSIONES

El control de asistencia de red propuesto para un SGRH eólico particular maximiza la producción de H_2 independientemente de las fluctuaciones de potencia del viento. En el esquema de control en cascada implementado reviste especial interés el lazo de realimentación interno dedicado a la regulación de las corrientes de red. El controlador diseñado sigue la referencia dada por el lazo externo conmutando entre seis estados discretos del convertidor de conexión a red. El sistema afín conmutado presentado como modelo del SGRH proviene del análisis de la dinámica continua asociada a cada estado discreto en el marco de referencia d-q. La estrategia de conmutación propuesta para estabilizar el sistema se basó en la técnica de proyección mínima o *Min-Projection*, cuyo atractivo principal es la simplicidad de su interpretación y aplicación desde el punto de vista de ingeniería. La demostración de la estabilidad exponencial basada en la Función Común de Lyapunov pudo interpretarse geoméricamente en el interior de una circunferencia del plano d-q y verificarse mediante simulaciones numéricas.

Bibliografía

- [1] Zoulias E. y Lymberopoulos N., "Hydrogen-based autonomous power systems", Ed. Springer, 2008, pp. 25-40.
- [2] Zhou T., "Control and Energy Management of a Hybrid Active Wind Generator...", PhD thesis, 2009, pp. 15-21.
- [3] García Clúa J., De Battista H. y Mantz R., Int. J. Hydrogen Energy, **35**, 2010, 5786-92.
- [4] Utkin V., Guldner J. y Shi, J., "Sliding Mode Control in Electromechanical Systems", Ed. Taylor & Francis, 1999.
- [5] Liberzon D., "Switching in Systems and Control", Ed. Birkhäuser, 2003.
- [6] Bose B., "Power Electronics and AC Drives", Ed. Prentice-Hall, 1986.
- [7] García Clúa J., Mantz R., De Battista H. y Gallegos N., Proceedings XV RPIC, ISBN: 978-987-27739-7-7, 2013.
- [8] Pettersson S. y Lennartson B., Proceedings of the 2001 American Control Conference, 2001, vol. 1, pp. 223-228.