

## **ANÁLISIS DE UN SISTEMA AISLADO DE GENERACION EÓLICA.**

Roberto Fernández, Ricardo J. Mantz, Pedro E. Battaiotto  
UNLP-UNPSJB                      CICpba-UNLP                      UNLP

LEICI – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata – CC91- (1900) La Plata, Argentina.  
Tel-Fax: (54)(221)-4259306.

Universidad Nacional de La Plata (UNLP)  
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB)  
e-mail: [rfernand@venus.fisica.unlp.edu.ar](mailto:rfernand@venus.fisica.unlp.edu.ar)

Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICpba)

Resumen. El presente trabajo analiza el comportamiento de un sistema aislado de generación de energía eólica aplicado al bombeo de agua. El objetivo es maximizar la extracción de la energía disponible en el viento sin conocer la velocidad de éste. Como los distintos comportamientos del sistema pueden explicarse de manera relativamente sencilla independientemente del controlador utilizado, se analizan los problemas que deben resolverse y los resultados obtenidos y no se estudia el diseño del controlador propiamente dicho el cual se deriva de las herramientas provistas por modos deslizantes. Por medio de simulaciones es posible comprender claramente el comportamiento del sistema y observar un buen funcionamiento general del tipo de controlador empleado.

Palabras clave. Turbinas eólicas, bombeo de agua, máxima eficiencia.

### **INTRODUCCIÓN.**

La provisión de agua sigue siendo uno de los principales problemas para el desarrollo en regiones remotas. A lo largo de la historia, distintas civilizaciones han empleado mecanismos de acople directo para el bombeo de agua a partir de la energía del viento. Recientemente se han comenzado a popularizar los sistemas de bombeo con acoplamiento eléctrico (generador - motor) entre la turbina eólica y la bomba (Vick y Clark, 1996). El presente trabajo aborda el análisis de uno de estos sistemas con el objeto de maximizar el aprovechamiento del recurso eólico.

Debido a la característica cupla-velocidad no lineal de la turbina, el rendimiento de conversión es altamente dependiente de su punto de operación (Freris, 1990) (Borowy y Salameh, 1997). El máximo rendimiento se obtendrá al permitir que la turbina alcance la velocidad de giro óptima para cada velocidad de viento (Freris, 1990) (Muljadi et al, 1995). Dado que la medida de dicha velocidad reviste dificultades técnicas y económicas importantes (Freris, 1990) (Muljadi et al, 1995), existen alternativas de control que permiten alcanzar el punto óptimo prescindiendo de ella (Muljadi et al, 1997).

Por las razones citadas el controlador debe poseer características inherentemente robustas. En ese sentido la aplicación de los modos deslizantes (Utkin, 1981) (Utkin et al, 1999) (Sira Ramírez, 1988) (Sira Ramírez, 1993) permite resolver de manera relativamente sencilla estos inconvenientes garantizando la robustez de la implementación.

### **SISTEMA.**

El sistema que se analiza responde al esquema mostrado en la Figura 1 (en la que se ha agregado el lazo de control). Consta de dos subsistemas; el primero, turbina-generador sincrónico de imán permanente, convierte la energía cinética disponible en el viento en energía eléctrica; el segundo, motor de inducción-bomba, convierte la energía eléctrica en mecánica para el bombeo. La conexión entre ambos subsistemas se realiza mediante un enlace de C.C. con rectificador no controlado e inversor controlado, para optimizar el rendimiento de conversión de energía.

### **TURBINA-GENERADOR DE IMÁN PERMANENTE.**

El par y la potencia mecánica desarrolladas por la turbina a partir de la energía cinética del viento, están dadas por las siguientes expresiones (Freris, 1990) :

$$T_t = \frac{\pi \rho r^2 V^3 C_p(\lambda)}{2\Omega_t} \quad (1)$$

$$P_t = T_t \Omega_t \quad (2)$$

donde:  $C_p(\lambda)$ : coeficiente de potencia;  $\lambda = \Omega r / V$ : relación de punta de pala;  $r$ : radio de las palas;  $\rho$ : densidad del aire;  $V$ : velocidad del viento;  $\Omega$ : velocidad de rotación.

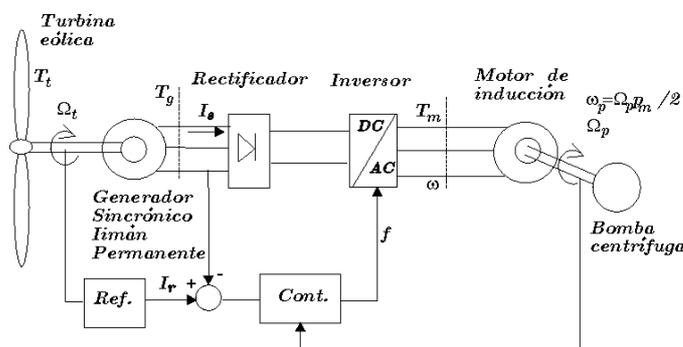


Figura 1. Sistema de conversión de energía para el bombeo de agua.

Tanto el coeficiente de potencia  $C_p(\lambda)$  como la potencia  $P_t$  alcanzan un máximo para un único valor  $\lambda = \lambda_{opt}$ , lo cual implica la conveniencia de operar a la turbina a velocidad variable, en función de la velocidad del viento. La optimización de la conversión de energía se logra para:

$$\Omega = \frac{\lambda_{opt} V}{r} = \Omega_{opt} \quad (3)$$

Luego la máxima potencia que se puede extraer del viento viene expresada por:

$$P_{mx} = \pi \rho r^2 \left( \frac{\Omega_{opt} r}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_p(\lambda_{opt}) / 2 = T_{to} \Omega \quad (4)$$

De igual forma existe un  $\lambda = \lambda_{mx}$  para el cual se obtiene la cupla máxima:

$$T_{mx} = \pi \rho r^2 \left( \frac{r}{\lambda_{mx}} \right)^3 \Omega_{mx}^2 C_p(\lambda_{mx}) / 2 \quad (5)$$

El generador sincrónico es modelado por una fuente de tensión dependiente de la velocidad, en serie con la inductancia sincrónica (Bose, 1986). Su cupla mecánica resistente, en función de la tensión, corriente o potencia en bornes estatóricos, conectado a un rectificador no controlado, es (Muljadi et al, 1995):

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p V_s I_s}{\omega_e L_s} = \frac{3 V_s \phi p}{2 \omega_e L_s} \sqrt{1 - \left( \frac{V_s}{\omega_e \phi} \right)^2} = \frac{3}{2} I_s \phi p \sqrt{1 - \left( \frac{L_s I_s}{\phi} \right)^2} \quad (6)$$

donde:  $V_s$ ,  $I_s$ : tensión y corriente en bornes del generador;  $\phi$ : flujo estatórico;  $\omega_e$ : frecuencia angular eléctrica;  $p$ : polos;  $L_s$ : inductancia sincrónica.

#### MOTOR DE INDUCCIÓN – BOMBA.

Este subsistema está formado por un motor de CA tipo jaula de ardilla y una bomba centrífuga. El motor de inducción es controlado a flujo constante a través de su frecuencia de excitación. La idea es, actuar sobre ésta para lograr que el par de carga del generador, consecuencia de la potencia reflejada en sus bornes por el conjunto motor – bomba, maximice la extracción de energía del viento. Luego, la acción de control se efectúa sobre la carga para conseguir el citado objetivo. El par del motor de inducción  $T_{mi}$  en la zona de bajo resbalamiento, se puede aproximar por (Bose, 1986):

$$T_{mi} = \frac{3}{2} p_m \frac{\Psi^2}{R_r} (\omega - \omega_p) \quad (7)$$

con  $\omega$  la frecuencia angular estatórica,  $\Psi = V_{mi} / \omega$  el flujo del motor de inducción,  $p_m$  la cantidad de polos del motor de inducción,  $V_{mi}$  la tensión en bornes del motor,  $\omega_p = \Omega_p p_m / 2$  la pulsación angular eléctrica que corresponde a la velocidad de

giro de la bomba ( $\Omega_p$ ) y  $R_r$  la resistencia rotórica. La (7) justifica la existencia de la medida de la velocidad de la bomba en la Fig. 1.

El caudal que la bomba produce es proporcional a la potencia disponible y a la denominada altura de carga o altura manométrica que fija el valor de caudal mínimo que se puede extraer y, por ende, la potencia mínima de funcionamiento del sistema (Mataix, 1975). A su vez, la potencia mecánica que la bomba absorbe del motor puede ser aproximada por las leyes de semejanza (Mataix, 1975), que se aplican muy frecuentemente en experimentación de turbomáquinas hidráulicas. En virtud de ellas se puede establecer que el par resistente es una función cuadrática de su velocidad angular (Mataix, 1975), (Muljadi, 1997):

$$T_p = k_p \Omega_p^2 = k_p \omega_p^2 (2/p_m)^2 \quad (8)$$

siendo  $T_p$  el par resistente y  $k_p$  la constante de la bomba.

## MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA

Se puede demostrar (Fernández et al, 2000) en esta configuración (Fig. 1) que, imponiendo un lazo de regulación del par del generador sincrónico con el objeto de alcanzar la  $P_{mx}$  disponible, se obtienen mejores resultados que regulando tensión o potencia (ec. (6)) considerando el error en la determinación de la velocidad de giro de la turbina. Luego, regular el par es la elección obligada (dado que el par de referencia depende sólo de la velocidad de giro pero el de la turbina de las velocidades de giro y del viento, se establece la convergencia hacia los puntos de equilibrio del sistema. En ellos, se tiene la máxima transferencia de energía). Si en (6) se simplifica la expresión del par de carga del generador (la inductancia es muy pequeña) en función de la corriente, se observa una relación directa entre par y corriente luego, el objetivo pasa a ser regular la corriente en el generador (Fig. 1). A partir de esta expresión puede obtenerse el valor de la corriente de referencia.

$$I_r = \frac{2}{3} \frac{T_{io}}{\phi p} \quad (9)$$

con  $T_{io} = P_{mx}/\omega$ . A su vez, la corriente de carga del generador será función de la potencia que consume el motor de inducción el cual refleja un par de carga en bornes del generador:

$$I_s = \frac{2}{3} \frac{P_{mi}}{\Omega_t \phi p} \quad (10),$$

con  $\Omega_t$  la velocidad de la turbina. El comportamiento dinámico de la turbina viene expresado por:

$$\dot{\Omega}_t = \frac{T_t - T_e}{J_t + gip} \quad (11)$$

donde  $J_{t+gip}$  es el momento de inercia de la turbina y del generador de imán permanente, como el par de carga depende de la potencia consumida por el motor se tiene:

$$\dot{\Omega}_t = \frac{T_t - T_{mi} \Omega_p / \Omega_t}{J_t + gip} \quad (12)$$

La ecuación de la bomba es:

$$\dot{\Omega}_p = \frac{T_{mi} - T_p}{J_{mi+p}} \quad (13)$$

con  $J_{mi+p}$  el momento de inercia de la bomba y del motor de inducción. Además, la salida es el seguimiento de la corriente de referencia, por lo que el objetivo es hacerla nula.

$$y = I_r - I_s \quad (14)$$

Siendo las últimas tres, las ecuaciones de estado del sistema representando los fenómenos físicos relevantes del mismo (Miranda et al, 1999). Como la acción de control es la frecuencia de excitación del motor de inducción, el controlador debe actuar sobre el inversor para que éste aplique la frecuencia correspondiente (a flujo constante) sobre el motor de inducción con el objeto de hacer nula la salida tal como ha sido propuesta.

## SISTEMA CONTROLADO

Las simplificaciones realizadas, considerar la inductancia del generador despreciable, la característica lineal planteada en la zona de bajo resbalamiento del motor y la característica cuadrática de la bomba centrífuga, son sólo aproximadas produciéndose diferencias con la implementación (encuadradas en la incertidumbre de los elementos). Además, como no se dispone de la medida del viento se lo considera una perturbación (que varía en todo el rango de potencias a extraer) y por ende el controlador debe ser capaz de rechazar esta perturbación (advertir que (12) depende de la velocidad del viento) junto a las incertidumbres del sistema.

Existen diferentes maneras de determinar el controlador, la propuesta en la que se ha trabajado se basa en los sistemas de estructura variable y en un comportamiento particular de ellos denominado modo deslizante. No es el objetivo presentar la teoría de los modos deslizantes pero sí un bosquejo muy resumido de los mismos. Las leyes de control desarrolladas en este contexto establecen cambios en la estructura del sistema cuando el punto representativo del mismo cruza ciertas superficies (hipersuperficies) en el plano (espacio) de fase del sistema. En resumen, la teoría busca en estos casos seleccionar esas superficies (denominadas superficies de conmutación o superficies de discontinuidad) y las estructuras de manera racional para obtener el comportamiento deseado. Así se puede obtener un sistema global y asintóticamente estable a partir de sintetizar correctamente dos sistemas inestables (Itkis, 1976). En las condiciones citadas, cuando se cumplen ciertas relaciones puede aparecer un movimiento particular denominado modo deslizante. Supongamos que en la vecindad de la superficie la función de control tiene el valor que establece el movimiento de los estados hacia ella. El punto, evidentemente, no se puede mover en las adyacencias de ésta sino por cortos periodos. Efectivamente, en respuesta a cualquier corrimiento, siempre se establece un movimiento que lo retorna a la superficie. Luego, el punto que describe el comportamiento del sistema puede moverse sólo a lo largo de ella, a este movimiento se lo denomina comúnmente modo o régimen deslizante. Si entonces la superficie pasa a ser la salida aquí propuesta, un controlador de las características citadas forzará la evolución hacia ella garantizando que el sistema se deslice siguiendo la curva que corresponde a la máxima transferencia de energía. Las propiedades de los modos deslizantes si bien son de naturaleza local (Sira Ramírez, 1988), han sido de probada robustez a lo largo de las más diversas aplicaciones en muy disímiles campos tecnológicos. En los modos deslizantes convencionales, la modificación de la estructura se realiza en la variable que significa el esfuerzo de control del sistema de manera que el cambio (que idealmente es infinitamente rápido) entre dos valores extremos hace que el sistema vea un valor equivalente (Utkin, 1981) y no los instantáneos. En este caso, dado que la frecuencia de excitación del motor no puede alterarse tan fácilmente, se debe modificar al sistema agregando un estado adicional cuyo objetivo sea el filtrado de la señal discontinua (dada por el cambio de la estructura). Esta modificación sobre el modo deslizante convencional se conoce como *modo deslizante dinámico* (Sira Ramírez, 1993). Se puede demostrar que este controlador estabiliza al sistema, rechaza las perturbaciones y las incertidumbres presentadas modificando, a partir de un valor mínimo, la ganancia del filtro adicionado ( $W$ ) (Fernández et al, 2001). A medida que es incrementada, mejor es este comportamiento pero el filtrado es menor (Sira Ramírez, 1993) perjudicando al motor. En definitiva, debe elegirse un valor de compromiso para  $W$ .

## RESPUESTA DEL SISTEMA CONTROLADO

La Figura 2 presenta el perfil de viento empleado en la simulación. Se trata de una señal regular como las utilizadas habitualmente en la Teoría de Control Clásico que, no tratándose de un perfil real, permite explicar el comportamiento de los elementos del sistema de manera ordenada y sencilla.

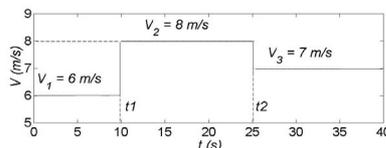


Figura 2. Señal de viento empleada en la simulación.

En la Figura 3 se aprecia la evolución del lado de generación del sistema. Se presentan las tres velocidades de viento involucradas en la simulación (nótese la característica altamente no lineal de las curvas de la turbina en las que se indican las velocidades de viento involucradas, ec. (1)) y la curva de máxima transferencia de energía  $T_{10}$  (determinada a partir de a velocidad de giro y sin conocer la velocidad del viento, ec. (4)). Dada la condición inicial  $A$ , se produce el cambio en la velocidad del viento al valor de  $8\text{ m/s}$  en  $t_1 = 10\text{ s}$ , el par de la turbina cambia al valor  $I$  produciendo un par acelerador  $\Delta T_{(t_1)}$  y la carga permanece por la referencia calculada a partir de la velocidad de giro de la turbina. En consecuencia mientras el par de la turbina evoluciona por la curva  $I - B$ , la carga viaja por  $A - B$  donde permanecerá hasta el siguiente cambio de viento que se produce en  $t_2 = 25\text{ s}$ . Producida la disminución en la velocidad del viento, el par desacelerador  $\Delta T_{(t_2)}$  se encarga del frenado de la turbina y la convergencia al punto  $C$ . En efecto, mientras el camino recorrido por el par de la turbina es  $II - C$ , la carga se desplaza por  $B - C$ .

En la Figura 4 se presenta la evolución del lado de la carga. Se han marcado la característica de bajo resbalamiento del motor de inducción, la característica cuadrática de la bomba y el valor de par que en cada instante el motor aplica sobre la bomba centrífuga. Se muestran los puntos  $A'$ ,  $B'$  y  $C'$  que corresponden a los analizados del lado de la generación.

Pueden darse circunstancias en las que el sistema abandone la superficie dada la conjunción de diversos factores, las inercias de uno y otro lado (Muljadi et al, 1995a) (Muljadi et al, 2000) y el valor de la ganancia  $W$ . En efecto, cuando se produce un salto extremo en la velocidad de viento, la inercia de la columna de líquido cobra mayor importancia y el par de carga de la bomba aumenta a un valor superior al dado por las leyes de similitud (Mataix, 1975). La Figura 5 muestra que el modo deslizante no se establece en todo instante. Si se parte desde una condición inicial (velocidad de viento de  $6\text{ m/s}$ ) en la que la turbina se está desacelerando (punto  $A$ ), evoluciona por la superficie elegida (la referencia) hasta que encuentra el equilibrio en  $A'$ , en esas condiciones se produce un salto extremo en la velocidad del viento que acelera al conjunto de generación. La

rapidez de cambio de la velocidad de giro del lado de generación debe ser *seguida* desde el lado de la carga, si ésta no se consigue aparece el citado efecto, la carga no puede mantenerse sobre la superficie (únicamente lo hace hasta  $A'$ ) y recién la alcanza en  $B$  para evolucionar sobre ella (frenando a la turbina) hasta encontrar el equilibrio en  $C$ .

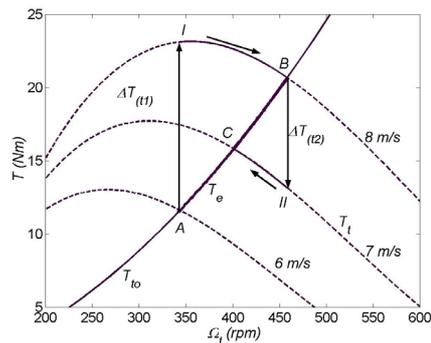


Figura 3. Evolución en el plano par – velocidad de la turbina.

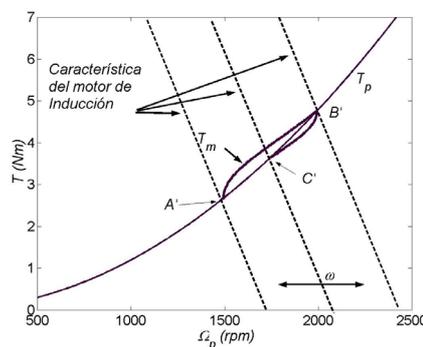


Figura 4. Evolución de lado de la carga.

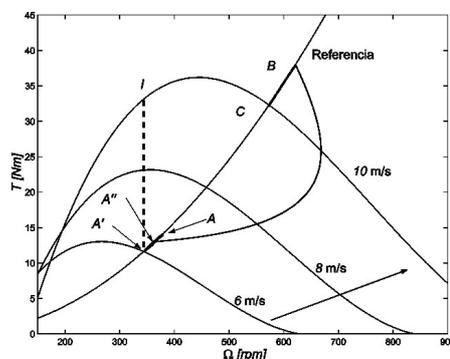


Figura 5. Pérdida de la referencia

Una variante no menor es proteger al motor por sobrecalentamiento dado que asegurar el funcionamiento en la zona de bajo resbalamiento puede no ser suficiente. Efectivamente, a bajas velocidades de giro, como el par del motor puede ser el nominal, las pérdidas rotóricas (Bose, 1986) pueden sobrecalentarlo dada la poca refrigeración del mismo (baja velocidad = bajo caudal disponible). Una solución es la de acotar las pérdidas enunciadas disminuyendo el par del motor a medida que lo hace la velocidad (operación a resbalamiento constante). Esta limitación al par del motor de inducción se traduce en un límite a la frecuencia de excitación del mismo (ec. (7)). Luego, en presencia de un salto extremo en la velocidad del viento, el controlador puede requerir una frecuencia de excitación al motor de inducción que, por cuestiones de protección, la limitación impedirá, estableciéndose una diferencia entre el estado del integrador y el valor de la frecuencia que efectivamente se aplica al motor. Este fenómeno es conocido como Reset – Windup y debe ser controlado.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado de manera resumida el comportamiento de un sistema aislado de generación de energía eólica aplicado al bombeo de agua. El análisis se ha basado en la evolución del lado del subsistema generador sin perder de vista que el control que permite cumplir con los objetivos citados se realiza del lado de la carga. Se han analizado sucintamente los puntos en los que debe centrarse el diseño del controlador, de los cuales el desconocimiento de la velocidad del viento es el de mayor importancia. Señales de viento regulares permiten comprender el funcionamiento del conjunto de manera sencilla. La

diferencia entre las inercias intervinientes a cada lado y su relación (se puede plantear al esquema como un transformador de energía cuya relación de transformación es, precisamente, la relación de velocidades) así como los límites en los que debe encontrarse la ganancia  $W$  pueden dar lugar a que el comportamiento se aparte de la referencia cuando se produce un salto extremo en la velocidad del viento. El marco precedente junto a la restricción del resbalamiento del motor de inducción dan lugar al reset – windup en el controlador. Se debe elaborar la solución para que la respuesta se degrade lo menos posible. Como una línea futura de investigación, además de elaborar la estrategia de anti-reset wind-up, se propone implementar una estrategia que permita operar al sistema cuando las velocidades de viento son mayores que la dada por la potencia nominal de la bomba pero no lo suficiente como para que sea peligrosa la operación del mismo.

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

## **BIBLIOGRAFÍA.**

Borowy B. S. y Salameh Z. M. (1997). “Dynamic Response of a Stand-Alone Wind Energy Conversion System with Battery Energy Storage to a Wind Gust”. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, pp. 73 - 78, March 1997.

Bose B.K. (1986). “Power Electronics and AC Drives”. Prentice-Hall.

Fernández R.D., Battaiotto P.E. y Mantz R. J (2000). “GENERACIÓN EÓLICA EN BOMBEO DE AGUA, ERRORES DE MEDIDA Y OPTIMIZACIÓN.” VII Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y de Sistemas. INTERCON 2000. 15 al 18 de agosto de 2000.

Fernández R.D., Mantz R. J. y Battaiotto P.E.. (2001) “Control por Modo Deslizante de un Sistema de Bombeo de Agua. Optimización de la Conversión de Energía.” RPIC 2001. Trabajo aceptado para su publicación.

Freris L.L. (1990) . “Wind Energy Conversion Systems”. Prentice-Hall international.

Itkis U, (1976). “Control Systems of Variable Structure”. Wiley.

Miranda M., Lyra R.O.C. y Silva S.R. (1999), “An alternative isolated wind electric pumping system using induction machines” , IEEE Transactions on Energy Conversion, 14(4):1611-1616, December.

Muljadi E. , Drouilhet, S.; Holz, R. ; Gevorgian, V. y Holz, R. (1995). “Analysis of Wind Power for Battery Charging”. The Department of Energy. DE96000472, NREL/TP--441-8170.

Muljadi E., Flowers L., Green J. y Bergey M., (1995a). “Electric Design of Wind-Electric Water Pumping Systems”. Wind Energy Simposium. Houston. Texas, 16:35-43.

Muljadi E. , Pierce K. y Migliore P. (1997). “Control strategy for Variable-Speed, Stall-Regulated Wind Turbines”. National Wind Technology Center, National Renewable Energy Laboratory.

Muljadi E., Nix G. y Bialasiewicz J.T., (2000). “Analysis of the dynamics of a Wind-turbine Water-pumping System”. Proceedings of the 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, 4:2506-2519. July.

Sira Ramírez, (1988) “Differential geometric methods in variable – structure control.” International Journal of Control, 48(4):1339-1390.

Sira Ramírez, (1993) “On the dynamical sliding mode of nonlinear systems.” International Journal of Control, 57(5):1039-1061.

Utkin V, (1981), “Sliding Mode in Control and Optimization.” Springer-Verlag.

Utkin V, Jurgen G. y Jingxin S (1999), “Sliding Mode Control in Electromechanical Systems.” Taylor & Francis.

Vick V.D. y Clark R.N. (1996), “Performance of Wind Electric and Solar – PV Water Pumping Systems for Watering Livestock”, Transactions of the ASME, Vol. 118, pp. 212 - 216, November.

**Abstract.** This work is about the behavior of a wind electrical water pumping system. The objective is to achieve maximum wind energy capture. The proposed control strategy does not require wind speed measurement. Because of different behaviors may be analysed without taking into count the kind of the controller, it is established the objective as the study of problems and results but it is not directly involved with the choice of the controller although there are employed tools from Sliding Modes which are successfully used in many control fields. Simulation results are presented and they permit to understand system evolutions but also a robust performance of the controller.