

Control del sistema electromecánico de un sistema eólico

Control of the electromechanical system of a wind power system

Alejandro Linares-Enríquez^{1}*

RESUMEN

Se presenta una propuesta de control para el sistema mecánico-eléctrico de un sistema eólico de baja potencia como una alternativa de generación de energía eléctrica renovable. Se analiza la conversión de energía mecánica de los elementos del sistema para definir las variables que intervienen y los parámetros a controlar. También se muestra un análisis de ingeniería en el aerogenerador, desde su eje de baja velocidad hasta el generador eléctrico, considerando la potencia útil que se obtiene del viento, transmitiéndola al eje a una velocidad angular inicial. Se muestra y establece la dinámica y la cinética, especificando los parámetros y el intervalo de control, así como el comportamiento de la velocidad angular, de la potencia y del torque. Se valida el análisis teórico a través de la simulación con el apoyo de la herramienta de Matlab, estableciendo el comportamiento del sistema y su estabilidad a través del control moderno y redes neuronales artificiales.

Palabras clave: control, simulación, modelo, sistema eólico, sistema mecánico.

ABSTRACT

A proposal to control the mechanical-electrical system of a wind low power system is presented as an alternative to generating renewable electricity. The mechanical energy conversion of the element system is analyzed to define the variables involved and the control parameters. An engineering analysis is also presented in the turbine from its low speed shaft, to the electric generator, considering the useful power obtained from the wind to the axis transmitting an initial angular velocity. The dynamics and kinetics it's shown and establishes, specifying the parameters and the control range, and the behavior of the angular speed, power and torque. The theoretical analysis is validated through simulation with the support of Matlab tool, establishing the system behavior and stability through modern control and artificial neural networks.

Keywords: control, simulation, model, wind power system, mechanical system.

¹ Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, México.

* Correo de contacto: alejandroing06@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

La energía eólica es hoy en día una de las tecnologías renovables más competitivas y con costos de generación más bajos. Así mismo, es una de las energías renovables que nos brinda los mayores beneficios y posibilidades. Su empleo produce impacto en el medio ambiente y a su vez tiene poca afectación por los cambios que el hombre provoca a su entorno (Dalmau, 2013). Un aerogenerador convierte la energía mecánica en eléctrica a través de la energía cinética del sistema. Se determina la potencia y el torque que se transmite al eje del aerogenerador, los cuales son fundamentales para el funcionamiento y control del sistema eólico.

La producción de energía eléctrica generada por el viento en una determinada área depende de la velocidad en el sitio y las características de velocidad de la turbina eólica. Sin embargo, la elección de los parámetros depende de las frecuencias del viento en el lugar de la instalación. Esta propuesta analiza los componentes de un aerogenerador, la conversión de energía y su eficiencia de conversión, los cuales definirán los parámetros de entrada del sistema. Con los elementos de diseño mecánico y análisis de ingeniería se establece el movimiento de rotación, la torsión y el momento de inercia, así como el desarrollo del equilibrio torsional y la transmisión de potencia. Se definen los parámetros para el desarrollo del modelo del sistema mecánico, se analiza la energía cinética y la energía potencial a través de las ecuaciones de Newton y las ecuaciones de Euler-Lagrange. Se definen las variables del sistema mecánico, que son la relación de engranajes N , la resistencia torsional k , el coeficiente de fricción viscosa B y el momento de inercia J . Se determinan los parámetros a controlar, que son: la aceleración equivalente, la aceleración de salida y la velocidad equivalente del sistema. Se presenta la estructura para el control del sistema, comparando esta respuesta, entre control moderno y control inteligente con la aplicación de redes neuronales artificiales, se desarrolla la simulación para establecer la respuesta de control del sistema y los parámetros a controlar.

DESARROLLO

Estos sistemas están compuestos por un rotor, un multiplicador, freno de disco, generador, cola, torre, cableado, controladores, inversores y baterías, como se muestra en el modelo generado de la Figura 1. A través del giro de los alabes, la turbina convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio que acciona el generador. La energía disponible del viento es la energía cinética de las masas de aire moviéndose sobre la superficie de la tierra. La energía cinética del aire con una masa m y moviéndose a una velocidad v está dada por

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Considerando el rotor expuesto a una ráfaga de aire, la energía cinética disponible será:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho_2 v^2 \quad (2)$$

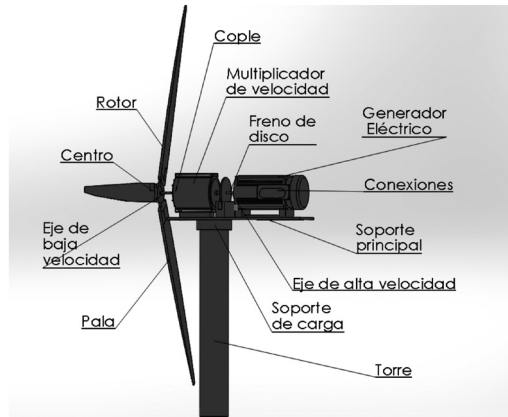


Figura 1. Componentes de un aerogenerador.
 Fuente: Elaboración propia.

La potencia disponible en una corriente de aire está dada por la ecuación (2) y, su eficiencia es llamada comúnmente como coeficiente de potencia (C_p):

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T v^3} \quad (3)$$

Mediante la ley de la conservación de la masa, el flujo de la masa de aire debe ser igual en todo el tubo de flujo y el gasto másico constante, por lo cual:

$$\dot{m} = \rho_a A_1 V_1 = \rho_a A v_w = \rho_a A_2 V_2 \quad (4)$$

donde la variación de la energía cinética del viento por unidad de tiempo es:

$$P_{\text{útil}} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho_a A v_w (V_1^2 - V_2^2) = \rho_a A v_w^2 (V_1 - V_2) \quad (5)$$

Estableciendo que la potencia útil máxima del rotor considera el coeficiente de potencia y el límite teórico de Betz, el cual no puede ser mayor al 59.5% (Garduño *et al.*, 2012).

El movimiento de rotación es importante para el análisis del sistema eólico y, la ley de Newton de rotación considera que la suma algebraica de los momentos alrededor de un eje fijo es igual al producto de la inercia por la aceleración angular del eje, la ecuación es:

$$\sum \text{Momentos} = T = J\alpha = J \frac{dw}{dt} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (6)$$

donde J es la inercia, α es la aceleración angular, T es el par, w es la velocidad angular, θ es el desplazamiento angular (Budynas y Nisbett, 2008), (Beer y Johnston, 2004a), (Beer y Johnston, 2004b), (Mabie y Reinholtz, 2002).

Si se tiene un par constante en el movimiento rotacional, la potencia está dada por:

$$P = Tw \quad (7)$$

Para la transmisión de potencia, ésta se diseña considerando los requisitos de potencia y par de torsión, las especificaciones de engranes, el diseño del eje, el análisis de fuerzas, el diseño del eje para esfuerzo y para deflexión, la selección de cojinetes y el análisis final dentro del diseño para obtener el sistema real (Budynas y Nisbett, 2008), (Mabie y Reinholtz, 2002).

Un tren de engranes es un dispositivo mecánico que transmite energía de tal forma que altera el par, la velocidad y el desplazamiento. Las relaciones entre los desplazamientos angulares θ_1 y θ_2 , los pares T_1 y T_2 , las velocidades angulares w_1 y w_2 , los radios r_1 y r_2 y, los números de dientes N_1 y N_2 del tren de engranes, deben ser consideradas en la relación de transformación como:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{N_1}{N_2} = N \quad (8)$$

Modelo del sistema eólico

La potencia disponible en la turbina se encuentra a partir de:

$$P_{\text{útil}} = P_w C_p = \frac{1}{2} C_p \rho_a AV_w^3 \quad (9)$$

La potencia que extrae la turbina eólica, también se puede representar como el producto del par aerodinámico T_A , y la velocidad rotacional w_T como sigue:

$$P_{\text{útil}} = T_A w_T \quad (10)$$

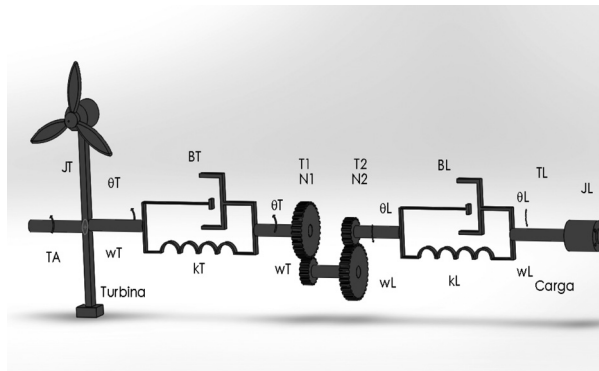
Modelo estático

La parte del modelo estático considera un sistema no lineal del rotor de la turbina. Se define la potencia mecánica que depende de los parámetros como: el coeficiente de potencia C_p y la velocidad del viento. El coeficiente C_p se expresa como una porción de la potencia mecánica extraída del total de potencia disponible, que se refleja en la velocidad angular del eje primario y está definida en función de la relación de velocidad específica o periférica, TSR.

Modelo dinámico

Para el análisis del modelo dinámico es importante considerar el movimiento de rotación y del tren de engranes, en la Figura 2 se establecen las variables que define la matriz de estados y establece los parámetros que transmiten la energía. De acuerdo con la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional, se tiene:

$$\sum T = J\dot{\omega} \quad (11)$$



- N_1 y N_2 , = Número de dientes de los engranes
- BT y BL = Coeficientes de fricción viscosa en la turbina y en la carga
- k_T y k_L = Resistencia torsional en la turbina y en la carga
- T_A = Torque de la turbina o entrada
- T_L = Torque del generador o de salida
- T_1, T_2 = Torques del sistema de engranes
- θ_T y θ_L = Desplazamientos angulares de la turbina y de la carga
- ω_L y ω_T = velocidades angulares de la turbina y de la carga
- J_T y J_L = Momento de inercia de la turbina y de la carga

Figura 2. Modelo dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

Para el eje de baja velocidad, es decir, para el eje de la turbina se tiene:

$$T_A - B_T \frac{d\theta_T}{dt} - k_T \theta_T - T_1 = J_T \frac{d^2\theta_T}{dt^2} \quad (12)$$

Para el eje de alta velocidad, es decir, para el eje de la carga se tiene:

$$T_2 - B_L \frac{d\theta_L}{dt} - k_L \theta_L - T_L = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \quad (13)$$

Despejando T_1 de la ecuación (12), sustituyendo la relación $T_1 = N T_2$, y despejando a T_2 e igualando para T_2 de las ecuaciones (12) y (13) se obtiene:

$$T_A/N = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} + J_T/N \frac{d^2\theta_T}{dt^2} + B_L \frac{d\theta_L}{dt} + B_T/N \frac{d\theta_T}{dt} + k_L \theta_L + k_T/N \theta_T + T_L \quad (14)$$

Al sustituir en la ecuación (14) las relaciones $\theta_T = \frac{1}{N} \theta_L$, se obtiene:

$$T_A/N = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} + J_T/N^2 \frac{d^2\theta_L}{dt^2} + B_L \frac{d\theta_L}{dt} + B_T/N^2 \frac{d\theta_L}{dt} + k_L \theta_L + k_T/N^2 \theta_L + T_L \quad (15)$$

De la ecuación (15) se obtienen las siguientes equivalencias:

$$J_e = \left(J_L + \frac{J_T}{N^2} \right); \quad B_e = \left(B_L + \frac{B_T}{N^2} \right); \quad k_e = \left(k_L + \frac{k_T}{N^2} \right) \quad (16)$$

Donde J_e es el momento de inercia equivalente, k_e es la rigidez equivalente; B_e es el coeficiente de fricción viscosa equivalente.

El modelo obtenido es un sistema con tres elementos que almacenan energía, los cuales se seleccionan como variables de estados $\dot{\theta}_{Te}$, $\dot{\omega}_L$ y $\dot{\theta}_e$. Se analiza el sistema equivalente obteniendo el modelo en variables de estado, al apoyarse en la ley de Newton para el movimiento rotacional, $\sum T = J\dot{\omega}$. El sistema equivalente se obtiene como:

$$T_A/N - B_e \left(\frac{d\theta_{Te}}{dt} - \frac{d\theta_L}{dt} \right) - k_e (\theta_{Te} - \theta_L) = J_T/N^2 \frac{d^2\theta_{Te}}{dt^2} \quad (17)$$

$$B_e \left(\frac{d\theta_{Te}}{dt} - \frac{d\theta_L}{dt} \right) - k_e (\theta_{Te} - \theta_L) - T_L = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \quad (18)$$

$$\dot{\theta}_e = \omega_{Te} - \omega_L \quad (19)$$

Con las relaciones obtenidas se tiene:

$$J_T / N^2 \dot{\omega}_{Te} = T_A / N - B_e \omega_{Te} + B_e \omega_L - k_e \theta_e \quad (20)$$

$$J_L \dot{\omega}_L = B_e \omega_{Te} - B_e \omega_L - k_e \theta_e - T_L \quad (21)$$

Al despejar $\dot{\omega}_{Te}$ y $\dot{\omega}_L$ de las ecuaciones (20) y (21) se tiene:

$$\dot{\omega}_{Te} = -B_e N^2 / J_T \omega_{Te} + B_e N^2 / J_T \omega_L - k_e N^2 / J_T \theta_e + T_A N / J_T \quad (22)$$

$$\dot{\omega}_L = B_e / J_L \omega_{Te} - B_e / J_L \omega_L + k_e / J_L \theta_e + T_A / N J_L \quad (23)$$

y de la ecuación (19), $\dot{\theta}_e = \omega_{Te} - \omega_L$

De manera que el sistema en variables de estado se representa como:

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_{Te} \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{\theta}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{B_e N^2}{J_T} & \frac{B_e N^2}{J_T} & -\frac{k_e N^2}{J_T} \\ \frac{B_e}{J_L} & -\frac{B_e}{J_L} & \frac{k_e}{J_L} \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{Te} \\ \omega_L \\ \theta_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{N}{J_T} \\ 1 \\ \frac{1}{N J_L} \end{pmatrix} T_A$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{Te} \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Te} \\ \omega_L \\ \theta_e \end{bmatrix}$$

El modelo representa el sistema dinámico del sistema eólico en variables de estado, en el cual, al analizar el torque, se obtiene el esfuerzo cortante con los parámetros del sistema mecánico (Kuo, 1996), (Nice, 2004). Además, el seguimiento de la potencia eléctrica se realiza después de tener los parámetros mecánicos del aerogenerador, obteniéndose la potencia mecánica que será la entrada al generador eléctrico.

Control moderno y redes neuronales artificiales (RNA)

Uno de los problemas de los sistemas de generación de energía eólica es el control del equipo a velocidad variable. El control establece reconocer las variables para mantener el sistema dentro de los parámetros de operación, éste es por control moderno a través de variables de estado (VE),

control proporcional integral derivativo (PID) y el control a través de redes neuronales artificiales (RNA). Esta información establece el control a través de sistemas lineales como:

$$\dot{x}=Ax+Bu \quad (25)$$

$$y=Cx+Du \quad (26)$$

El sistema lineal describe que la salida $y(t)$ se obtiene del estado $x(t)$ y de las entradas $u(t)$, las salidas son elegidas con base al sistema y se establece para el análisis de la matriz de transferencia. La matriz $G(s)$ relaciona a $y(t)$ con el vector $u(t)$ en el dominio de Laplace y está relacionada con las matrices A B C y D (Jacques y Weiping, 1991), (Ogata, 1987), (Bolton, 2010).

$$Y(s)=G(s)U(s) \quad (27)$$

Por otro lado, el uso de las redes neuronales es la evolución de la teoría de control. La necesidad de controlar sistemas dinámicos complejos bajo incertidumbre ha conducido a contar con nuevos métodos (Haykin, 1999), (Serrano, Soria y Martín, 2009).

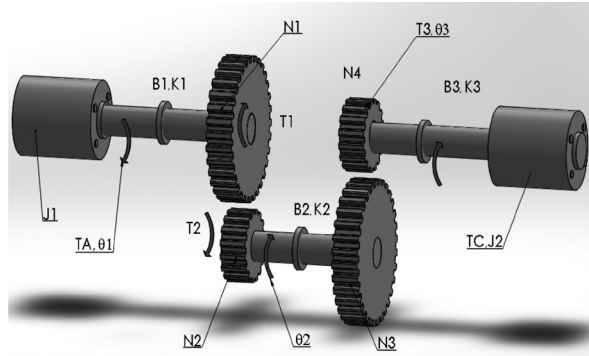
Control moderno y neuronal del sistema mecánico

Para el control del sistema se deben conocer las variables y los elementos que intervienen para la obtención de los parámetros de operación y la generación de la matriz de estados. Estos valores se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1. VARIABLES DEL SISTEMA EÓLICO.

Concepto	Valor	Unidad
Densidad del aire ρ_a	1.2	kg/m ³
Radio del rotor de la turbina	3	m.
Radio del eje de baja velocidad	0.025	m.
Radio del eje de alta velocidad	0.025	m.
Velocidad del viento	0-25	m/s
Constante de rigidez del eje de baja velocidad k_e	150	N.m/rad
Constante de rigidez del eje de alta velocidad k_c	15	N.m/rad
Coefficiente de fricción viscosa del eje de baja velocidad	0.24	N.m.s/rad
Coefficiente de fricción viscosa del eje de alta velocidad	0.055	N.m.s/rad
Paso diametral de engranes	24	Dientes/plg
Diámetro engrane 1 y 3	18	plg
Diámetro engrane 2 y 4	6	plg
Relación de engranajes N	9	

Fuente: Elaboración propia.



N_1, N_2, N_3, N_4 = Número de dientes del engrane 1, 2, 3 y 4
 K_1, K_2, K_3 = Coeficiente de rigidez 1, 2 y 3
 B_1, B_2, B_3 = Coeficiente de fricción viscosa 1, 2 y 3
 J_1, J_2 = Momento de inercia 1 y 2
 T_A = Torque de entrada
 T_C = Torque al generador o de salida
 T_1, T_2, T_3 = Torques del sistema de engranes
 θ_1, θ_2 y θ_3 = Desplazamientos angulares 1, 2 y 3

Figura 3. Sistema mecánico.
 Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se establecen las variables mecánicas del tren de engranes para la obtención de los parámetros a controlar, donde se genera la matriz de estados y de transferencia del sistema.

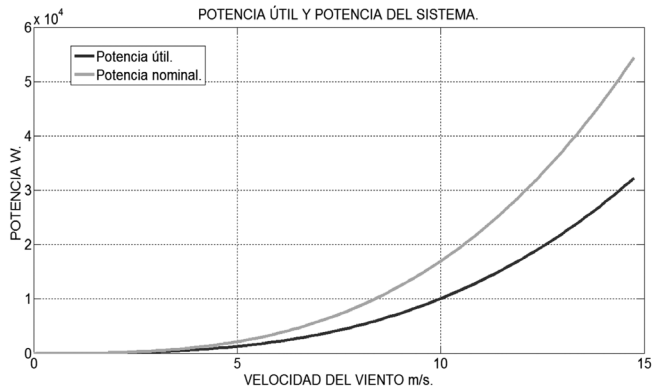


Figura 4. Potencia nominal y la potencia útil con base en la velocidad del viento.
 Fuente: Elaboración propia.

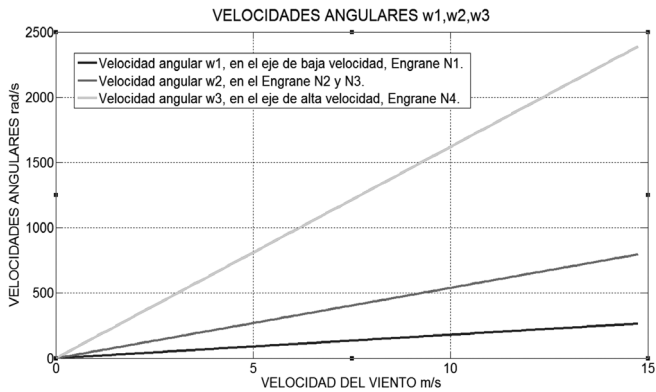


Figura 5. Velocidades angulares en el tren de engranajes.
 Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4 se observa el comportamiento de la potencia que se genera con la velocidad del viento. La potencia útil se establece para una potencia de 2 a 10 kW. En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la velocidad angular en el tren de engranajes. Con este resultado, la velocidad en el eje de alta velocidad proporciona la potencia solicitada y, a su vez que el torque no provoque fallas en el sistema eólico.

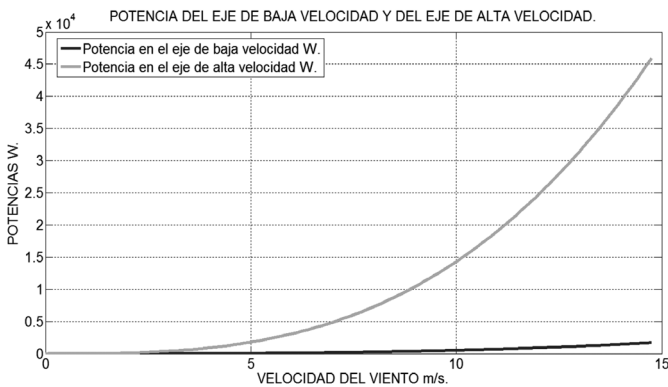


Figura 6. Potencia del eje de baja velocidad y en el eje de alta velocidad.
 Fuente: Elaboración propia.

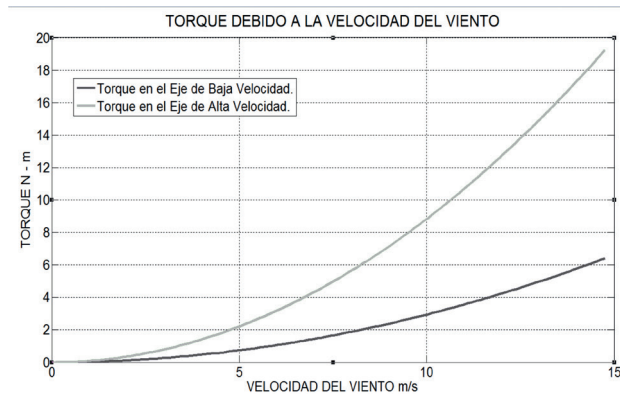


Figura 7. Torque en el eje de baja y alta velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento de la potencia mecánica en el eje de baja y alta velocidad. La potencia de salida es la que se transmite al generador eléctrico para su aprovechamiento. De esta manera, para una potencia de 5kW, la velocidad del viento está en el orden de los 6 a 9 m/s. Con esta potencia se garantiza el consumo de energía, generando un abastecimiento de 300 kWh promedio al mes.

Con el análisis del sistema mecánico del aerogenerador se determina el torque, parámetro de diseño dentro de la ingeniería y la mecánica de materiales. Se debe analizar el torque para que no se provoquen fallas en el sistema. Asimismo, se debe tener el funcionamiento adecuado del sistema para lograr controlar tanto el torque como los demás parámetros, como se muestra en la Figura 7, donde el torque está en el intervalo de 2 a 20 N·m.

RESULTADOS

Para determinar el control del sistema eólico se establece su capacidad y se debe predecir su comportamiento dinámico a partir de sus componentes, donde para su análisis la característica más importante del sistema de control es la estabilidad. Al analizar un sistema de control, es necesario examinar el comportamiento de la respuesta transitoria y el comportamiento en estado estable. Esta información proporciona los elementos para el diseño de una estrategia y algoritmo de control. Las estrategias se basan en la estructura y acomodo de los componentes que interactúan con la planta, mientras que los algoritmos se diseñan una vez que se elige la estrategia y se basan en la dinámica del sistema y la dinámica deseada (Nice, 2004), (Ogata, 1987), (Haykin, 1999).

Método de control de un aerogenerador basado en control moderno por variables de estado (VE).

Para el análisis del sistema mecánico en variables de estado representado en la ecuación (24), se realiza la función de transferencia introduciendo los valores, de acuerdo al programa tenemos:

$$A_g = [-(B_e \cdot N^2)/J_e \quad (B_e \cdot N^2)/J_e \quad -(k_e \cdot N^2)/J_e; \quad B_e/J_c \quad -B_e/J_c \quad k_e/J_c; \quad 1 \quad -1 \quad 0]$$

$$B_g = [N/J_e; \quad 1/(N \cdot J_c); \quad 0]$$

$$C_g = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$D_g = [0]$$

Con la obtención de la matriz en variables de estado se tienen las ganancias del sistema mecánico para su controlabilidad y observabilidad. Al estructurar el sistema en variables de estado se logra la matriz de estados y todos los parámetros que intervienen en el control.

En la Figura 8 se muestra la respuesta del sistema en variables de estado, se establece su estabilidad, parámetros de la simulación y comportamiento; siendo una alternativa de solución considerar el control por variables de estado de acuerdo con las matrices A, B, C y D para obtener la respuesta deseada. Al analizar la planta y controlar los parámetros, se controla el torque, la potencia y el esfuerzo cortante, siendo una solución al sistema.



Figura 8. Respuesta del sistema mecánico del aerogenerador por VE.

Fuente: Elaboración propia.

Método de control de un aerogenerador basado en un control Proporcional Integral Derivativo (PID).

Después de analizar el sistema, otra forma para comparar la estabilidad de la respuesta del sistema eólico, es estableciendo la estrategia de control a través de un control PID. En este tipo de control se obtiene la función de transferencia del sistema y se resuelve la transformada de Laplace, donde se generan los polos y ceros del sistema de control.

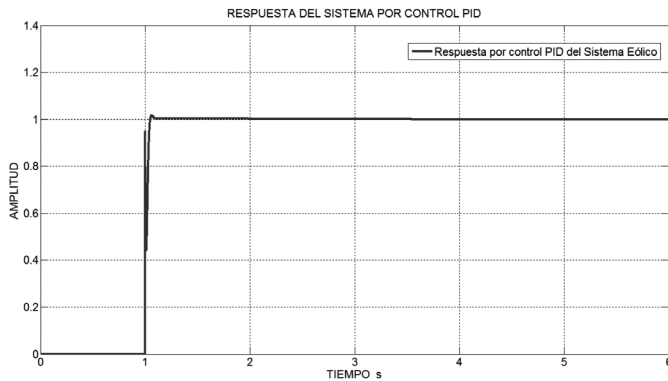


Figura 9. Respuesta del sistema mecánico del aerogenerador por PID.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se obtiene el control del sistema mecánico en el cual se analiza el comportamiento del aerogenerador y su control PID. La estabilidad del equipo se logra rápidamente y se muestra de acuerdo con la señal de salida mediante el control de la velocidad angular y el torque, con el control de estos parámetros, se indica que la potencia de salida es controlable, además se evitan problemas por esfuerzo cortante que se generen en el sistema eólico.

Método de control de un aerogenerador basado en redes neuronales artificiales (RNA)

Este sistema de control debe responder con la exactitud, estabilidad y rapidez necesaria ante la variabilidad y aleatoriedad del viento. La relación entre las variables de salida y de entrada debe aprovechar la máxima potencia disponible en la zona de trabajo y limitarla en otra, sin que sobrepase la capacidad mecánica considerando el esfuerzo cortante, par torsional y la potencia. (Haykin, 1999), (Serrano, *et al.*, 2009). Para un aerogenerador, el método de control es por reconocimiento de patrones y de valores de la velocidad del viento plasmados en la velocidad angular del eje primario, el par torsional y la potencia. Se recolectan los datos como serie de tiempo, actualizándose dato tras dato. Al tener el conjunto de datos se procesan en el módulo de reconocimiento de patrones, donde la topología adecuada de la RNA *Backpropagation* interpretará a los datos y hará la mejor clasificación del mejor patrón y de la predicción de sus valores futuros (Fajardo y Vázquez, 2010).

Para este control se definen dos estrategias de control que son: el control a potencia constante y el control a torque constante, se optó por el control a torque constante, donde el sistema de control tiene como objetivo mantener constante el torque producido por la turbina para

velocidades del viento arriba de la velocidad nominal. La ventaja principal del control de torque es que se reducen los esfuerzos mecánicos de los componentes del tren de potencia, reduciendo así el número de fallas y costos de mantenimiento.

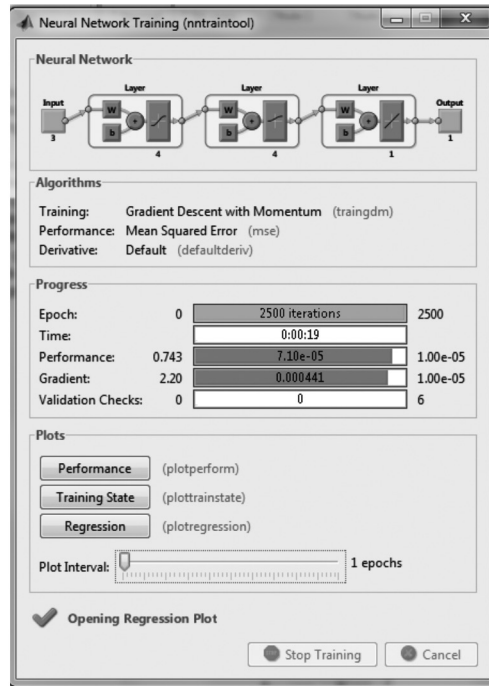


Figura 10. Estructura de la red neuronal para el análisis del sistema eólico.

Fuente: Elaboración propia.

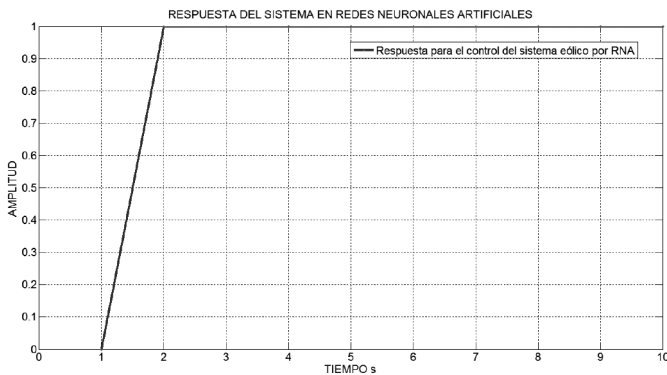


Figura 11. Respuesta del sistema mecánico del aerogenerador por RNA.

Fuente: Elaboración propia.

La red neuronal multicapa que se analizó es una red neuronal de 3 entradas, 4 capas en su primera capa oculta, 4 capas en su segunda capa oculta y 1 capa de salida, donde el torque se mantiene en los valores establecidos para su control, con las funciones de entrenamiento:

$P = [T; w; P_u];$

$net = newff([0 \ 7; 0 \ 70; 0 \ 5000], [4, 4, 1], {'tansig', 'logsig', 'purelin'}, 'traingdm');$

En la Figura 10 se establece una primera capa oculta con una función de transferencia tipo “tansig”, [-1 a 1], la segunda capa oculta con una función de transferencia “logsig”, [0 a 1], la capa de salida considera una función “purelin”, además, la red neuronal considera la red de entrenamiento “traingdm”. En la Figura 11 se da la respuesta de la simulación a través de redes neuronales, dando solución a los parámetros a controlar y el parámetro de salida deseado, generando el funcionamiento adecuado. Se establece la respuesta del sistema para su estabilidad considerando la función “satlin” que es una función de transferencia lineal positiva, teniendo al torque como valor de salida, parámetro de observación y estabilidad en la red neuronal.

CONCLUSIONES

El analizar el sistema mecánico establece los parámetros y las variables a controlar, los elementos de diseño y la ingeniería para conocer todas las características de funcionamiento del aerogenerador. Además se debe analizar el comportamiento del equipo para evitar fallas mecánicas que se contemplan en el proyecto y las alternativas de solución.

Se establecen las técnicas de control comparando las respuestas en los diferentes casos para determinar cuál de estos sistemas de control darán un mejor funcionamiento al sistema eólico y su estabilidad. Se analiza que no existan cambios en la aceleración del sistema y en la velocidad angular, dando como resultado el controlar el torque y la potencia. Con la realización de programas y simulaciones obtenemos el comportamiento del sistema eólico y la respuesta de control en variables de estado y control proporcional integral derivativo, comparando este control con la red neuronal artificial, se logra la estabilidad, la forma de aprendizaje y la arquitectura que darán como salida el mejor resultado y respuesta del control del sistema eólico.

El proyecto establece, desarrolla y muestra la importancia del control y de la ingeniería dentro de los sistemas eólicos, por lo que los resultados obtenidos de las formas de control demuestran la estabilidad, el funcionamiento y la operación del aerogenerador.

REFERENCIAS

- Beer, F. y Johnston, E. R. (2004a), *Mecánica de Materiales*, tercera ed., Mc Graw Hill, Estados Unidos de América.
- Beer, F. y Johnston, E. R. (2004b), *Mecánica Vectorial para Ingenieros*, octava ed., Mc Graw Hill, Estados Unidos de América.
- Bolton, W. (2010), *Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, cuarta ed., Alfaomega, Barcelona, España.
- Budynas, G. y Nisbett, J. K. (2008), *Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley*, novena ed., Mc Graw Hill, México.
- Dalmau, A. (2013), *Plan integral para el desarrollo de las energías renovables en México 2013-2018*. PWC Climate Works Foundation Iniciativa Mexicana para las Energías Renovables (IMERE) y el World Wildlife Fund (wwf), México.
- Fajardo, J. L. y Vázquez J. A. (2010), *Método de Control de un Aerogenerador basado en Redes Neuronales Artificiales*, Universidad Autónoma de Zacatecas, Instituto Tecnológico de Celaya, México.
- Garduño, R., Sánchez, M. y Hernández, R. (2012), “Investigación, desarrollo e innovación tecnológica de sistema del control de aerogeneradores”, *Boletín IIE*, abril-junio, 2012, pp. 47-55, México.
- Haykin, S. (1999), *Neural Networks a Comprehensive Foundation*, segunda ed., Prentice Hall, Canadá.
- Jacques, E. J. y Weiping, L.S. (1991), *Applied Nonlinear Control*, Editorial Prentice Hall, Estados Unidos de América.
- Kuo, B. C. (1996), *Sistemas de Control Automático*, séptima ed., Prentice Hall Hispanoamericana, México.
- Mabie, H. y Reinholtz, F. (2002), *Mecanismos y Dinámica de Maquinaria*, segunda edición, editorial Limusa Wiley, México.
- Nice, N. S. (2004), *Sistemas de Control para Ingeniería*, tercera ed., Editorial Continental, México.
- Ogata, K. (1987), *Dinámica de Sistemas*, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA., México.
- Serrano, A. J., Soria, E. y Martín, J. D. (2009), *Redes Neuronales Artificiales*. Universitat de Valencia, España, [En línea] disponible en http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/1-2/course_listing, (consultado el 6 de marzo de 2017).