

## **Diseño, simulación y control de un sistema eólico**

LINARES-ENRIQUEZ, Alejandro\*† y ROMERO-PASARÓN, Samuel

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco*

Recibido Enero 12, 2017; Aceptado Marzo 6, 2017

### **Resumen**

Se presenta una propuesta de abastecimiento a través de energías renovables, se desarrolla con el diseño y la simulación para llevar a cabo un prototipo y análisis de control de un aerogenerador, estableciendo que las energías renovables son una alternativa de generación de energía limpia y eficiente. Se analiza la conversión de energía mecánica de los elementos del sistema para definir las variables que intervienen y los parámetros a controlar. Se analiza desde el eje de baja velocidad, hasta el generador, considerando la potencia útil que se obtiene del viento al eje a una velocidad angular inicial. Se establece la mecánica de materiales, la dinámica, cinética y el sistema de control especificando la forma y el intervalo de control. Se simula el sistema para obtener un prototipo y se desarrolla el control para conocer su respuesta en estado estable y en estado transitorio, estableciendo el funcionamiento del sistema y su estabilidad a través de estrategias de control moderno y redes neuronales artificiales, con estos análisis determinar el comportamiento del sistema, control y operación, conociendo el proceso de aprendizaje y adaptación. Se establecen las ventajas de cada modelo de control, su respuesta para definir su implementación.

**Diseño, Simulación, Control, Sistema Eólico, Sistema Mecánico**

### **Abstract**

It presents a proposal of supply through renewable energies, is developed with the design and simulation to carry out a prototype and control analysis of a wind turbine, establishing that renewable energy is an alternative of generating clean and efficient energy. The mechanical energy conversion of the elements of the system is analyzed to define the variables involved and the parameters to be controlled. It is analyzed from the low speed axis, to the generator, considering the useful power that is obtained from the wind to the axis at an initial angular velocity. It establishes the mechanics of materials, dynamics, kinetics and the control system specifying the shape and the interval of control. It simulates the system to obtain a prototype and develops the control to know its response in steady state and in a transient state, establishing the operation of the system and its stability through modern control strategies and artificial neural networks, with these analyzes determine the System behavior, control and operation, knowing the process of learning and adaptation. It establishes the advantages of each control model, its response to define its implementation.

**Software, programming, electricity, kilowatt**

**Citación:** LINARES-ENRIQUEZ, Alejandro y ROMERO-PASARÓN, Samuel. Diseño, simulación y control de un sistema eólico. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 2017, 1-1: 19-29

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: alejandroing06@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La energía eólica es hoy en día una de las tecnologías renovables más competitivas y nos brinda los mayores beneficios y posibilidades. Su empleo produce impactos en el medio ambiente y a su vez tiene poca afectación por los cambios que el hombre provoca a su entorno. Un aerogenerador convierte la energía mecánica en energía eléctrica través de la energía cinética del sistema. Se determina la potencia y el torque que se transmite al aerogenerador, se establece el diseño, la simulación del sistema y forma de control, el cual es determinante para el funcionamiento y operación del sistema eólico, por lo que el sistema pretende autoabastecer energía en el sector de baja potencia.

La producción de energía eléctrica generada en un determinado sitio, depende de diferentes variables como la velocidad del viento en el sitio y las características de las aspas, además dentro del diseño se considera el análisis del tren de engranajes para la relación de velocidades y las características de funcionamiento, como la potencia, la velocidad angular y el torque que no cuentan actualmente los equipos. Así mismo, el modelo desarrollado es un medio mecánico de transformación para la relación de velocidad angular, el torque y la potencia con los mismos parámetros para la caracterización de las diferentes velocidades. Los parámetros a seleccionar dependerán de la potencia eléctrica que es necesaria en el lugar de la instalación y el consumo de energía kWh que se establezca, por lo que es importante obtener el máximo rendimiento de la potencia.

Con base a este último propósito, la propuesta analiza los componentes de un aerogenerador dentro del diseño, la simulación y la conversión de energía, para obtener la potencia mecánica que se transforma en energía eléctrica.

Se analizan los elementos de diseño, se establece el movimiento rotacional y la transmisión de potencia. Se definen las variables que intervienen en la transformación de parámetros dentro del modelado del sistema.

Además, se determinan los parámetros para el desarrollo del modelo del sistema eólico, se analiza la energía cinética y la energía potencial. Se definen las variables que intervienen en el sistema mecánico, con estas variables se determinan los parámetros a controlar.

Al controlar el sistema no se presentan variaciones en la potencia con la velocidad angular, además de fallas por esfuerzo cortante están controladas al controlar el torque. Se presenta la estructura para el control del sistema, comparando esta respuesta, entre control moderno y control inteligente, se desarrolla la simulación para establecer la respuesta de control del sistema y los parámetros a controlar.

México dispone de un potencial renovable indiscutible, con un amplio porfolio de recursos eólicos como los parques eólicos ya instalados. De acuerdo al estudio sobre el potencial eólico, México cuenta con un potencial eólico superior a los 50 GW. Esto de acuerdo a lo que comenta el estudio de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) y otras entidades, en el plan integral de desarrollo de las energías renovables en México 2013-2018 [1].

Dos aplicaciones que ha tenido la energía eólica a través del tiempo son: la navegación de vela y los molinos de viento. La primera de estas aplicaciones es la navegación de vela, es casi tan antigua como la propia humanidad. La otra aplicación son los molinos de viento, cuyo origen ubican algunos autores también antes de nuestra era, permitiendo la producción de cereales, donde prácticamente no existía la posibilidad de empleo de energía hidráulica.

La propuesta establece un aerogenerador con incremento de velocidad para el tipo de generador, ya que actualmente no se tiene este parámetro de incremento de velocidad angular, conservando la potencia lo que permita proporcionar una parte importante de la energía requerida en los hogares principalmente en las áreas rurales, pequeñas fábricas y comercios.

Las turbinas para aplicaciones de baja potencia pueden estar en el rango de 1kW hasta los 100 kW, dependiendo de la cantidad de electricidad que se desee generar que se plasma en un diagrama unifilar. Para aplicaciones residenciales o comerciales, es recomendable definir las necesidades de energía para establecer el tamaño adecuado del equipo que se requiere. Adicional al equipo eólico, podemos apoyarnos de nuevas tecnologías en iluminación tipo led, refrigeradores eficientes y motores de alta eficiencia, para el aprovechamiento de la energía generada. Debido a que la eficiencia energética apoya en la producción de energía. Con un diagrama unifilar podemos determinar el tamaño que se requiere de acuerdo a sus consumos de electricidad y al recurso eólico de su localidad, además del tamaño del aerogenerador a utilizar.

### Metodología a desarrollar

Estos sistemas por lo general están compuestos por el rotor, multiplicador, freno, generador, cola, torre, cableado, controladores y las baterías, como se establece en la simulación y se modela el equipo de acuerdo a la Figura 1. A través del giro de los alabes la turbina se convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio que acciona el generador. La energía disponible del viento es básicamente la energía cinética de las masas de aire moviéndose sobre la superficie de la tierra.

La energía cinética del aire moviéndose a una velocidad  $v$  está dada por:

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

Considerando un rotor con un área seccional  $A$  expuesta a una ráfaga de aire, la energía cinética de la ráfaga de aire disponible para una turbina es:

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

La potencia disponible en una corriente de aire está dada por la ecuación (2), donde una turbina no puede extraer esta potencia completamente del viento.



**Figura 1** Componentes de un Aerogenerador

*Fuente: Elaboración propia*

Esta eficiencia es llamada comúnmente como coeficiente de potencia ( $C_p$ ), dando:

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

Una turbina eólica no es capaz de extraer la potencia total que se encuentra en una masa de aire, sino que solo es capaz de extraer una fracción de está.

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:

$$P_{util} = \frac{d(E_c)}{dt} = \frac{1}{2} \rho_a A V_w (V_1^2 - V_2^2) = \rho_a A V_w^2 (V_1 - V_2) \quad (5)$$

Estableciendo que la potencia útil máxima que proporciona el rotor considera el coeficiente de potencia que se conoce como el límite teórico de Betz, no es mayor al 59.5%. [2].

Dentro del diseño el movimiento de rotación es importante para el análisis del sistema eólico, por lo que el análisis del movimiento rotacional considerando la velocidad angular  $w$  y, la aceleración angular,  $\alpha$ . El par  $T$ , que depende de la fuerza aplicada, de la distancia entre el eje de rotación y la línea de acción de la fuerza.

La ley de Newton de rotación considera la relación entre el par aplicado y su aceleración angular resultante y establece que la suma algebraica de los momentos o pares alrededor de un eje fijo es igual al producto de la inercia por la aceleración angular alrededor del eje, la ecuación es:

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

Donde  $J$  es la inercia,  $\alpha$  es la aceleración angular,  $T$  es el par,  $w$  es la velocidad angular y  $\theta$  es el desplazamiento angular [3, 4, 5, 6].

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

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

Para el diseño de la transmisión de potencia, esta debe considerar los requisitos de potencia, las especificaciones de engranes, el diseño del eje, el análisis de fuerzas, la selección de cojinetes y el análisis final dentro del diseño para obtener el sistema real [3,6].

Un tren de engranes es un dispositivo mecánico que transmite energía desde una parte del sistema a otro, de tal forma que se altera el par, la velocidad y el desplazamiento. Las relaciones entre los pares  $T_1$  y  $T_2$ , los desplazamientos angulares  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , los radios  $r_1$  y  $r_2$ , las velocidades angulares  $w_1$  y  $w_2$  y los números de dientes  $N_1$  y  $N_2$  del tren de engranes, deben ser consideradas para realizar el análisis de los engranes.

De esta manera, que se obtienen las siguientes relaciones del sistema de engranes:

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

### Modelo del Sistema Eólico

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

$$P_{util} = P_w C_p = \frac{1}{2} C_p \rho_a A V_w^3 \quad (9)$$

La potencia que extrae la turbina eólica, se puede ver de acuerdo a la ecuación (7).

Para el análisis del modelo dinámico es importante considerar el movimiento de rotación y del tren de engranes, que se muestra en la Figura 2, donde el modelo dinámico está formado por los elementos que se encargan de transmitir la energía del eje de baja velocidad hasta el eje de alta velocidad.

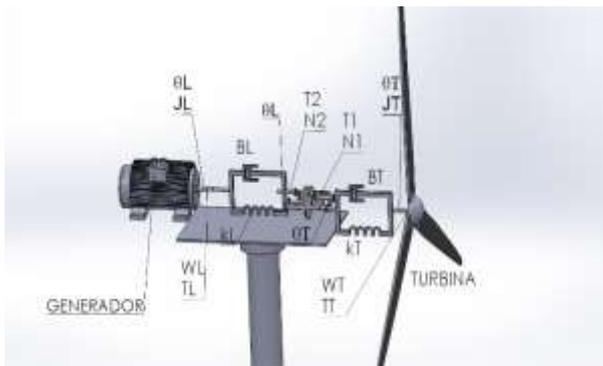


Figura 2 Modelo Dinámico

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional, se tiene:

$$\sum T = J\dot{\omega} \quad (10)$$

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

$$T_T - B_T \frac{d(\theta_T)}{dt} - k_T \theta_T - T_1 = J_T \frac{d^2 \theta_T}{dt^2} \quad (11)$$

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

$$T_2 - B_L \frac{d(\theta_L)}{dt} - k_L \theta_L - T_L = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} \quad (12)$$

Igualando las ecuaciones para  $T_2$ , se obtiene:

$$\frac{T_T}{N} = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + \frac{J_T}{N} \frac{d^2 \theta_T}{dt^2} + B_L \frac{d(\theta_L)}{dt} + \frac{B_T}{N} \frac{d(\theta_T)}{dt} + k_L \theta_L + \frac{k_T}{N} \theta_T + T_L \quad (13)$$

Agruparse términos, se obtiene:

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

El modelo obtenido es un sistema existente con tres elementos como parámetros a controlar

Se puede analizar el sistema equivalente obteniendo el modelo en variables de estado, al apoyarse en la ley de Newton para el movimiento rotacional.

El sistema equivalente se obtiene con las relaciones obtenidas y se tiene:

$$\frac{J_T}{N^2} \dot{\omega}_E = \frac{T_T}{N} - B_e \omega_E + B_e \omega_L - k_e \theta_e \quad (15)$$

$$J_L \dot{\omega}_L = B_e \omega_E - B_e \omega_L - k_e \theta_e - T_L \quad (16)$$

Al despejar  $\dot{\omega}_E$  y  $\dot{\omega}_L$  de la ecuación (15) y (16) se tiene:

$$\dot{\omega}_E = -\frac{B_e N^2}{J_T} \omega_{Te} + \frac{B_e N^2}{J_T} \omega_L - \frac{k_e N^2}{J_T} \theta_e + \frac{T_T N}{J_T} \quad (17)$$

$$\dot{\omega}_L = \frac{B_e}{J_L} \omega_{Te} - \frac{B_e}{J_L} \omega_L + \frac{k_e}{J_L} \theta_e + \frac{T_T}{N J_L} \quad (18)$$

y

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

De manera que la representación en variables de estado del sistema es de la forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (20)$$

$$y = Cx \quad (21)$$

El modelo dado 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 [7,8].

Además el seguimiento de la potencia eléctrica se realiza después de determinar los parámetros mecánicos del aerogenerador en el eje primario o eje de baja velocidad, con la velocidad angular y el torque, se obtiene la potencia a la entrada. Los parámetros de entrada se transforman en el sistema de engranajes, desarrollando una velocidad angular y torque en el eje de alta velocidad o en el eje del generador, obteniéndose la potencia mecánica que será la entrada al generador eléctrico [9].

## Control Moderno y Redes Neuronales Artificiales

Para los sistemas de generación de energía eólica uno de los problemas característicos es el control del equipo, por lo que es determinante analizar los diferentes modos de operación del sistema eólico a velocidad variable. Se analiza el sistema de acuerdo al diseño, a la simulación y al modelado desarrollado, se establecen los parámetros mecánicos a controlar y establecer la comparación del desempeño del equipo. La simulación permite definir el sistema, modelarlo, desarrollar las pruebas dentro del diseño y la formulación de un prototipo. El control establece reconocer las variables para mantener el sistema dentro de los parámetros de operación. Este control es la comparación del sistema por control moderno y el control a través de Redes Neuronales Artificiales (RNA).

El sistema se describe en función del tiempo con sus entradas, su proceso o estado transitorio y estable y, sus salidas, las cuales pueden ser elegidas con base al resultado que se quiere lograr en el sistema. También con el sistema lineal en variables de estado se puede establecer la representación en una matriz de transferencia. La matriz  $G(s)$  como estado,  $Y(s)$  como entrada y  $U(s)$  como la salida, en el dominio de Laplace, que se denomina matriz de transferencia. La matriz de transferencia  $G(s)$  en términos de Laplace está relacionada con las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  en variables de estado [10, 11, 12].

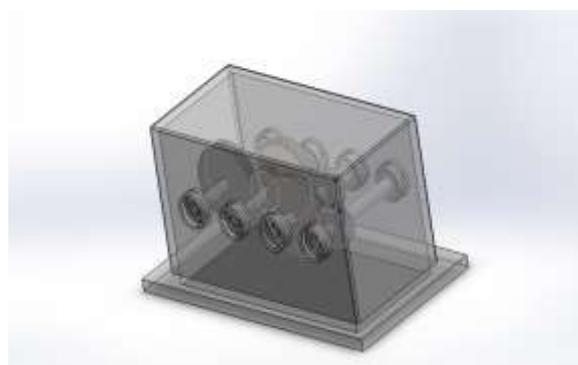
Para tener un control del sistema, se deben conocer que variables intervienen para la obtención de parámetros de operación y la generación de la matriz de estados. Para ello, se determinan los elementos del sistema eólico que serán las variables de inicio para poder desarrollar el estudio del sistema, estos valores se muestran en la Tabla 1. Estas variables determinan y establecen las características del sistema mecánico del aerogenerador.

Concepto	Valor	Unidad
Densidad del aire $\rho_a$	1.2	kg/m <sup>3</sup>
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
Relación de engranajes del sistema $N$	8	

**Tabla 1** Variables del sistema eólico

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura 3 se muestran los parámetros para el desarrollo del modelo realizado, se establece el sistema de transmisión, con la relación del tren de engranajes.

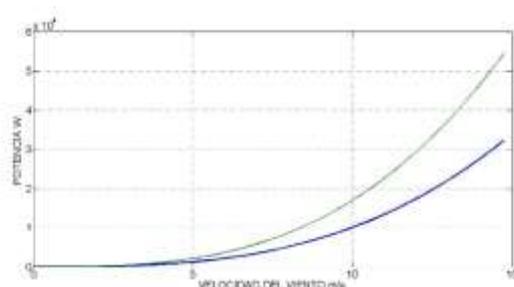


**Figura 3** Sistema Mecánico

*Fuente: Elaboración propia*

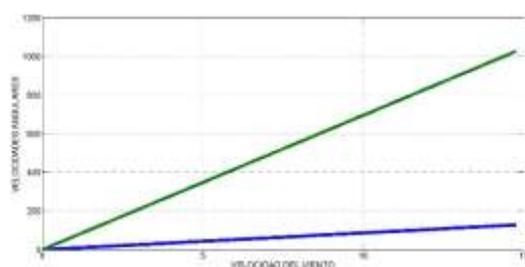
## Resultados

El análisis considera conocer los siguientes parámetros de funcionamiento, en la gráfica 1, se muestra el comportamiento de la potencia que se genera con la velocidad del viento en el intervalo de 5 a 10 m/s. La potencia útil se establece para una potencia de 2 kW a 10 kW. Esta potencia útil determina el torque que se generará en el eje de baja velocidad con base a la velocidad angular obtenida.



**Gráfico 1** Potencia nominal y la potencia útil con base a la velocidad del viento

*Fuente: Elaboración propia*



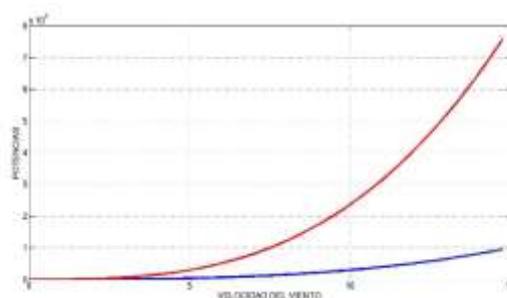
**Gráfico 2** Velocidades angulares en el tren de engranajes

*Fuente: Elaboración propia*

En la gráfica 2, se muestra el comportamiento de la velocidad angular en el tren de engranajes, con este resultado, la velocidad en el eje de alta velocidad proporcionará la potencia solicitada y a su vez, que el torque no provoque fallas en el sistema eólico de acuerdo a la mecánica de materiales. En la gráfica 3, se muestra el comportamiento de la potencia mecánica en el eje de baja velocidad y en el de alta velocidad.

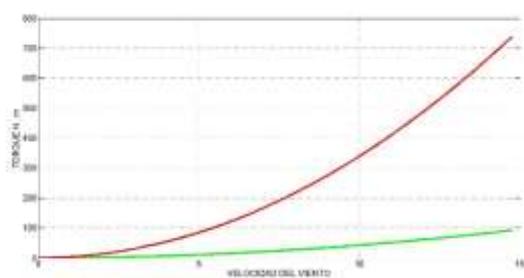
La potencia de salida es la que se transmitirá al generador eléctrico para su aprovechamiento. De esta manera para una potencia de 5kW la velocidad del viento está en el orden de los 6 a 8 m/s. Con esta potencia, se garantiza el correcto funcionamiento del consumo de energía, generando un abastecimiento de 12 kWh al día, con un consumo promedio de 360 kWh al mes.

Con él análisis del sistema mecánico del aerogenerador podemos conocer la velocidad angular y la potencia. Además el torque es un parámetro dentro del diseño y la resistencia de materiales, que debe ser calculado correctamente. Se debe analizar el torque para que no se provoquen fallas en el sistema. Asimismo se debe tener el funcionamiento adecuado para lograr controlar tanto el torque como los demás parámetros en él sistema, como se muestra en la gráfica 4, donde el torque está en el intervalo de 90 N-m a 720 N-m.



**Gráfico 3** Potencia del eje de baja velocidad y en el eje de alta velocidad

*Fuente: Elaboración propia*



**Gráfico 4** Torque en el eje de baja y alta velocidad

*Fuente:* Elaboración propia

Para determinar el control del sistema eólico establecemos la capacidad del sistema de tal forma que se comporte de la manera que se desea, al diseñar un sistema de control, se debe tener la capacidad de predecir su comportamiento dinámico a partir del conocimiento de los componentes, para nuestro análisis del sistema eólico desde el eje de baja velocidad al generador de energía, donde la característica más importante del comportamiento dinámico del sistema de control es la estabilidad.

Al analizar un sistema de control, se debe examinar el comportamiento de la respuesta transitoria y en estado estable. Esta información proporciona los elementos necesarios 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 ha elegido la estrategia y se basan en la dinámica del sistema y la dinámica deseada [8, 11, 13].

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

Para el análisis del sistema mecánico en variables de estado se obtiene realizando el programa de la función de transferencia e introduciendo los valores a la simulación de Matlab dando como resultado el programa siguiente:

$$A_g = \begin{bmatrix} -(B_e * N^2) / J_e & (B_e * N^2) / J_e \\ (k_e * N^2) / J_e & B_e / J_c - B_e / J_c k_e / J_c \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_g = [N / J_e; 1 / (N * J_c); 0]$$

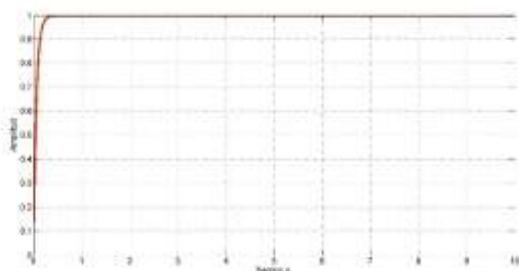
$$C_g = [1 \ 0 \ 0]$$

$$D_g = [0]$$

Con la obtención de la matriz en variables de estado obtenemos las ganancias para la estabilidad en la respuesta del equipo, además de la función de transferencia para obtener los polos y ceros que tiene el sistema mecánico para su controlabilidad y observabilidad.

Al estructurar el sistema en variables de estado obtenemos la matriz de estados y todos los parámetros que intervienen en el control, entre los que están el torque y que no existan cambios en la velocidad angular, analizando su comportamiento.

En la gráfica 5, se muestra la respuesta del sistema de las variables de estado donde se establece su estabilidad, el control de la velocidad angular y el par motor. Con estos parámetros se controla la potencia y el esfuerzo cortante para que funcione correctamente. Al introducir las variables y los parámetros a la simulación, se determina cómo se comporta el sistema, siendo una alternativa de solución considerar el control por variables de estado de acuerdo a las matrices A, B, C y D para obtener la respuesta deseada. Al analizar la planta y controlar los parámetros como la velocidad angular y el par, también se controla el torque, la potencia y el esfuerzo cortante, siendo una solución al sistema [15,16].



**Gráfica 5** Respuesta del sistema mecánico del aerogenerador por VE

*Fuente: Elaboración propia*

Control de un aerogenerador basado en Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Este sistema de control considerado en su conjunto, debe responder con la exactitud, estabilidad y rapidez necesaria ante la variabilidad y aleatoriedad del viento. La relación entre sus variables de salida y la de entrada en la velocidad del viento que sea capaz de aprovechar la máxima potencia disponible en el viento en una zona de trabajo y de limitarla en otra, cuando se supere un valor máximo que se comparará en la velocidad angular que alcanzará el eje primario, y que no sobrepase la capacidad mecánica considerando el esfuerzo constante, con par torsional y la potencia [13,14].

Para un aerogenerador el método de control es por reconocimiento de patrones y de valores de la velocidad del viento que se analizaran y serán plasmados en la velocidad angular del eje primario, su par torsional y su potencia, que serán las variables de entrada. Se recolectan los datos como serie de tiempo, actualizándose dato tras dato. Al tener un conjunto de datos entonces 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. Así, la forma de control del aerogenerador dependerá del tipo de patrón presentado y de la predicción de sus valores futuros.

Para el control de un sistema eólico se tienen dos estrategias de control que son: El control a potencia constante y 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 el número de fallas y costos de mantenimiento.

La red neuronal multicapa que se analiza 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 determinando el torque que se mantenga en los valores establecidos para su control, teniendo como funciones de entrenamiento:

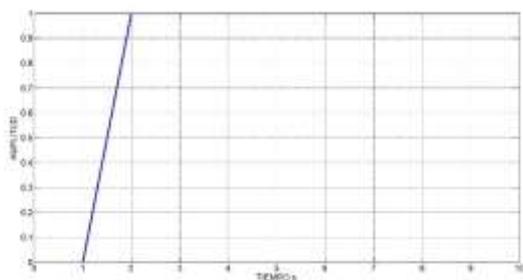
$$P = [T; w; P_u];$$

```
net= newff([0 720;0 900;0 5000],[4,4,1],
{'tansig','logsig','purelin'},'traingdm');
```

La respuesta por la red neuronal establece que los valores son concretos y que no existen pequeñas variaciones en los valores de entrada, que son la velocidad angular, el torque y la potencia.

En la gráfica 6, se desarrolla la simulación del sistema eólico, se analiza a través de redes neuronales, dando solución a los parámetros a controlar y considerando el parámetro de salida deseado, generando el funcionamiento adecuado en él comportamiento del control del sistema eólico. Se obtiene la representación para el control del sistema mecánico en el cual se analiza el comportamiento del aerogenerador y su control por RNA.

Se establece la respuesta del sistema para su estabilidad considerando la función “satlin” que es una función de transferencia lineal positiva, generando el valor de salida como el torque en el eje de alta velocidad, manteniendo los valores hasta los 720 N-m como parámetros para su observación, determinando que los parámetros se estabilizaran en la red neuronal, generando que los elementos de salida que es el torque se mantenga en el valor de estabilidad.



**Gráfico 6** Respuesta del sistema mecánico del aerogenerador por RNA

*Fuente:* Elaboración propia

## Conclusiones

El analizar el sistema mecánico permite establecer los parámetros y las variables a controlar, siendo de suma importancia los elementos de diseño y la ingeniería para conocer todas las características que hacen funcionar, mover y estructurar al aerogenerador. Además de los mecanismos y la estructura, se debe analizar el comportamiento del equipo para que no ocurran 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. Estableciendo 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 de la simulación obtenemos el comportamiento del sistema eólico y la respuesta de control en Variables de Estado, estableciendo una primera solución de la respuesta deseada del sistema con todos los parámetros a considerar, logrando los argumentos para el correcto funcionamiento del aerogenerador mostrado en el proyecto.

Con el desarrollo de programas y simulación de la red neuronal artificial a través de MATLAB obtenemos como los datos de entrenamiento y los datos de activación establecen el modelo neuronal, la forma de aprendizaje y la arquitectura que darán como salida el control del sistema eólico que presenta un mejor resultado de control.

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

## Referencias

- [1]. PwC en colaboración con Climate Works Foundation, Iniciativa Mexicana para las Energías Renovables (IMERE) y el World Wildlife Fund (WWF), Plan integral para el desarrollo de las energías renovables en México 2013-2018 Propuesta de escenarios y acciones necesarias para su desarrollo.
- [2]. Raúl Garduño Ramírez, Marino Sánchez Parra, Roberto Hernández González, Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica de Sistema del Control de Aerogeneradores, Boletín IIE, Abril – Junio - 2012.
- [3]. Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, Ed. Mc Graw Hill, Novena Edición.

- [4] Ferdinand P. Beer, E Russell Johnston, Jr. Mecánica de Materiales, Tercera edición, Mc Graw Hill, 2004.
- [5] Ferdinand P. Beer, E Russell Johnston, Jr. Mecánica Vectorial para Ingenieros, Octava edición, Mc Graw Hill, 2007.
- [6] Hamilton H. Mabie, Charles F. Reinholtz, Mecanismos y Dinámica de Maquinaria, editorial Limusa Wiley, segunda edición.
- [7] Benjamin C. Kuo, Sistemas de Control Automático, Séptima Edición, Prentice Hall Hispanoamericana.
- [8] Norman S. Nice, Sistemas de Control para Ingeniería, Tercera Edición, Editorial Continental.
- [9] William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly, Análisis de Circuitos en Ingeniería, cuarta edición, Mc GrawHill.
- [10] Jean Jacques E. Slotine Weiping Li, Applied Nonlinear Control, Editorial Prentice Hall.
- [11] Katsuhito Ogata, Dinámica de Sistemas, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA, primera edición, 1987.
- [12] William Bolton, Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en la ingeniería Mecánica y Eléctrica, editorial Alfaomega, cuarta edición.
- [13]. Simon Haykin, Neural Networks a Comprehensive Foundation, Segunda Edición, Prentice Hall, 1999
- [14]. Antonio J. Serrano, Emilio Soria, José D. Martín. Redes Neuronales Artificiales, 2009.
- [15]. Fernando Reyes Cortes, MATLAB, Aplicado a la Robotica y Mecatronica, Editorial Alfaomega, 2012.
- [16]. S.N. Sivanandam, S.Sumathi and S.N. Deepa, Introduction to Fuzzy Logic Using Matlab, Springer, 2007.