

Capítulo 6 Modelo, simulación y control del sistema eléctrico y electrónico de un sistema eólico de baja potencia

Chapter 6 Model, simulation and control of the electrical and electronic system of a low power eolic system

LINARES-ENRÍQUEZ, Alejandro† & REA-CABRERA, Edgar

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

ID 1^{er} Autor: *Alejandro, Linares-Enríquez* / **ORC ID:** 0000-0002-2250-0730, **Researcher ID Thomson:** F-8123-21018, CVU CONACYT-ID: 607628

ID 1^{er} Coautor: *Edgar, Rea-Cabrera* / **ORC ID:** 0000-0001-7529-9850, **Researcher Thomson ID:** G-1908-2018

A. Linares & E. Rea

alejandro.linares@test.edu.mx

A. Marroquín, H. Corres y L. Carpio. (Dir.) Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Queretaro, 2018.

1. Introducción

La energía eólica es hoy en día una de las tecnologías renovables más competitivas que 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 y el viento aprovechable, se determina la potencia y el torque que se transmite al eje del aerogenerador.

La producción de energía eléctrica generada por el viento en un determinado sitio depende de diferentes variables como la velocidad del viento, por lo que la propuesta del sistema eólico es para bajas velocidades de viento con un valor máximo de 12 m/s, que es un viento moderado, además de las características de las aspas y el sistema mecánico para transformar a energía eléctrica, se cuenta dentro del diseño el análisis en el tren de engranajes para la relación de velocidades y las características de funcionamiento entre potencia, velocidad angular y torque. 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 en los sistemas eléctricos.

En el desarrollo del proyecto se realiza el análisis de los componentes del aerogenerador dentro del diseño, su simulación y la conversión de energía, se definen los parámetros de entrada del sistema, para obtener la potencia mecánica que se transforma en energía eléctrica, se realiza la simulación del comportamiento mecánico, para pasar al modelo eléctrico, con el desarrollo se obtiene el modelo del sistema que se implementara a través de la simulación Lab-Volt y el equipo para la realización de pruebas del generador de imanes permanentes, donde se establecen las variables que intervienen en la transformación de parámetros, para establecer las características del sistema eólico.

Al conocerse los recursos eólicos del lugar de instalación, el principal problema que se visualiza es el abastecimiento de energía eléctrica para establecer la capacidad que tendrá el equipo y gracias a las energías renovables, estableciendo el sistema eléctrico, proponiendo los componentes de transformación, conversión y almacenamiento eléctrico, se satisfacen las necesidades en términos de independencia, seguridad energética y también se apoyan los objetivos medioambientales siendo un factor al que se le debe prestar la atención debida, con las características demandadas, donde este sistema desarrolla una potencia de hasta 25kW donde su aplicación es en inmuebles de baja capacidad o carga.

2. Desarrollo

Estos sistemas por lo general están compuestos por el rotor, multiplicador, freno, generador, cola, torre, cableado, controladores y las baterías, como se muestra en la simulación que permite predecir el comportamiento del sistema de acuerdo a la Figura 6.1. Donde a través del giro de los alabes la turbina convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio que acciona el generador eléctrico. 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 expuesta a una ráfaga de aire, la energía cinética de la ráfaga de aire disponible para una turbina será:

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

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:

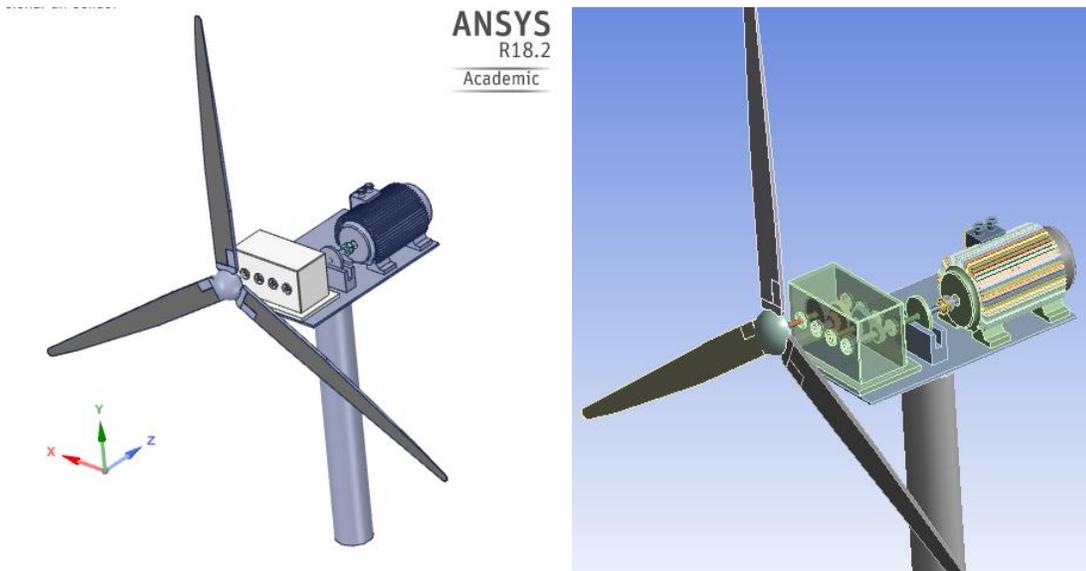
$$\dot{m} = \rho_a A_1 V_1 = \rho_a A V_w = \rho_a A_2 V_2 \quad (3)$$

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

$$P_{util} = \frac{d(E_c)}{dt} = \frac{1}{2} \rho_a A V_w (V_1^2 - V_2^2) = \rho_a A V_w^2 (V_1 - V_2) \quad (4)$$

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%. [1].

Figura 6.1 Componentes del Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

Dentro del diseño el movimiento de rotación es importante para el análisis del sistema eólico, 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:

$$\sum T = J \alpha = J \frac{dw}{dt} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (5)$$

Donde J es la inercia, α es la aceleración angular, T es el par, w es la velocidad angular, θ es el desplazamiento angular, en el que el par T es la fuerza de torsión que se transmite y se ejerce sobre los ejes y engranes, el par de torsión depende de la magnitud de la fuerza aplicada y de la distancia entre el eje de rotación y la línea de acción de la fuerza. Además dentro de la torsión el análisis del ángulo de giro en radianes de los ejes se calcula mediante el análisis torsional de la ley de Hooke $\tau = G\gamma$ y $\gamma = \rho\theta/L$ estableciendo el torque como una fuerza por una distancia: $T = \int \rho (\tau dA)$ y estableciendo a $\int \rho^2 dA = J$ que es el momento polar de inercia, obteniendo el ángulo de torsión en radianes, donde estos elementos son importantes para el desarrollo del sistema [2, 3, 4, 5].

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (6)$$

Donde:

T= Torsión.

L= Longitud.

G= Modulo de Rigidez.

J= Segundo Momento Polar de Inercia.

Para el análisis se considera que sobre los ejes actúan pares de torsión y cargas, el material obedece la ley de Hooke, además de considerar el análisis del sistema sometido a torsión, como sistema estáticamente determinado o estáticamente indeterminado y, considerar el análisis a través de sistemas hiperestáticos por el método de flexibilidades y método de rigideces para elementos sujetos a torsión.

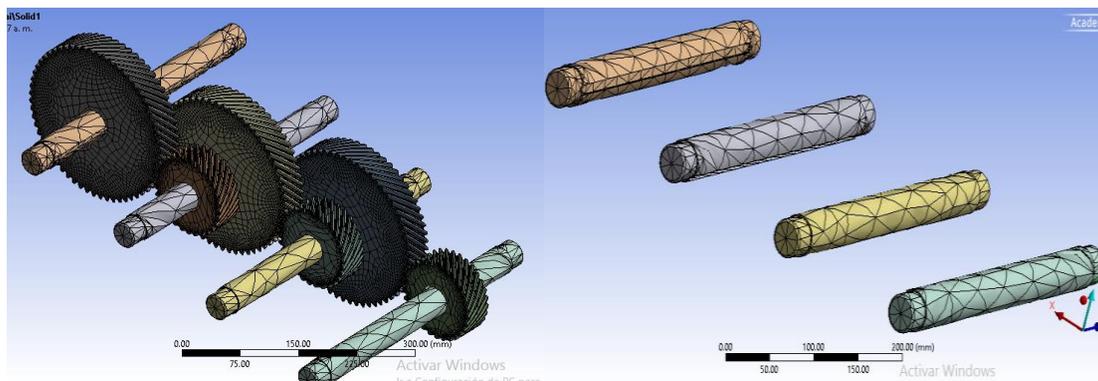
Con la determinación de la torsión se tiene un par constante en el movimiento rotacional, estableciendo la potencia por:

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

Esta representa la potencia transmitida por una flecha rotatoria que es el parámetro mecánico de transformación a energía eléctrica en watts, además se considera el torque T en Newton-metro y la velocidad angular en número de revoluciones por unidad de tiempo. Para el diseño de la transmisión de potencia, esta debe considerar los requisitos de potencia, las especificaciones de engranes, el diseño del eje y el análisis de fuerzas dentro del diseño para obtener el sistema real [2,5].

Se desarrolla el sistema mecánico con el análisis del elemento finito con el mallado de ejes y engranes, como se muestra en la figura 6.2, este análisis establece de acuerdo a la geometría y características del material el comportamiento mecánico, en el cual al desarrollar el mallado y simular cargas aplicadas, el obtiene que cada soporta las condiciones de esfuerzo y deformación, que transformará las condiciones de operación para correcto funcionamiento del sistema eólico [8-9].

Figura 6.2 Análisis Sistema Mecánico



Fuente: Elaboración Propia

Con el análisis mecánico establecemos para el sistema eléctrico la ley de voltajes de Kirchhoff, que es una herramienta útil para el modelo matemático de circuitos eléctricos y redes eléctricas. La primera ley de Kirchhoff establece que la suma algebraica de las intensidades entrantes en un nodo es nula en todo instante. La segunda ley de Kirchhoff establece que la suma algebraica de las tensiones a lo largo de cualquier línea cerrada en un circuito es cero en todo instante [6-7].

Un generador eléctrico es una máquina que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, estos generadores son el generador síncrono, el generador de corriente directa, el generador de imanes permanentes, el generador de reluctancia y el generador de inducción.

Un generador síncrono normalmente está constituido de un estator fijo que está enbobinado de manera trifásica y de un rotor que contiene un campo magnético. Al girar el campo magnético se genera una fuerza electromotriz (fem) en el estator, la forma de onda de la fem inducida es idéntica a la forma de onda del campo magnético en el espacio. La frecuencia de la fem está relacionada directamente con la velocidad de giro del rotor, razón por la cual se le conoce como generadores síncronos.

El campo magnético en el rotor se genera a través de una fuente de corriente continua, que es externa al generador y que permita graduar el campo magnético que se requiere, dadas estas características los SGE que emplean un SG emplean una topología back-to-back para conectar el estator con la alimentación o equipo de suministro, del lado del estator el convertidor regula el torque electromecánico mientras que del lado del equipo el convertidor regula la potencia activa y reactiva que se inyecta a las líneas para poder abastecer de energía en una red aislada que cuente con un motor o sistemas de iluminación. En el lado del rotor se coloca un convertidor AC/DC que proporcione la corriente para que se genere un campo magnético en el rotor, la única diferencia es que el rotor donde están adheridos los imanes se encuentra ubicado en la parte interna y el estator en la parte externa [10, 11].

Los generadores síncronos de imanes permanentes tienen el mismo principio de funcionamiento que los generadores síncronos, con la diferencia que el campo magnético en el rotor es generado por imanes permanentes. El flujo es constante y, se reduce el mantenimiento comparado con el SG, ya que no se tiene que alimentar el rotor para generar el campo magnético. Los GSIP son empleados principalmente en SGE de baja potencia de kW, al tener un campo magnético constante en el rotor aumenta la eficiencia, ya que no se necesita potencia externa para generar el campo magnético. Los SGE con GSIP operan a velocidad variable y pueden trabajar en redes eléctricas aisladas.

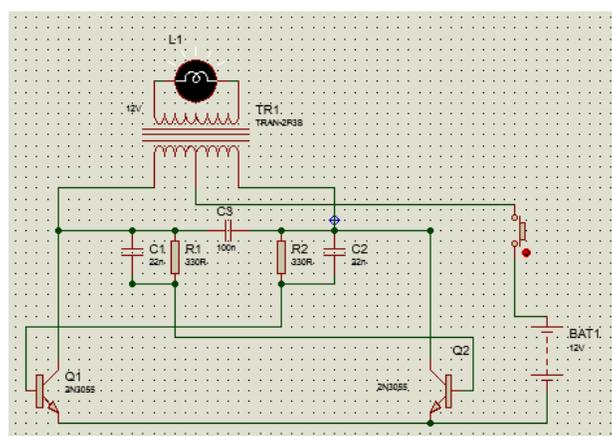
Un generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial consiste en que el estator posee las bobinas y el rotor consiste en dos platos separados los cuales poseen los imanes. La forma de operación de un generador síncrono está basada en la ley de Faraday, ya que al girar unos imanes permanentes frente a unas bobinas que se encuentran estacionarias, por el interior de estas pasa el flujo magnético que es variable en el tiempo, generando un voltaje inducido alterno en las bobinas.

El generador síncrono de flujo axial no necesita corriente de excitación por lo que le da una eficiencia superior a este, además que tiene la capacidad de que las bobinas en el estator son en parte refrigeradas debido a la rotación de los imanes permanentes sobre estas. Se decide realizar el cálculo del generador eléctrico y no contar con uno comercial debido a que los torques de arranque de los comerciales, en general son difíciles de superar por el rotor diseñado, mientras que con un generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial lo único que se debe vencer para iniciar el arranque es la inercia sobre los rodamientos.

La topología trabajada es una topología Back-to-Back, en esta el convertidor del lado del generador regula el torque electromagnético del generador y reduce la distorsión armónica en corriente y aumenta el factor de potencia empleando técnicas de control vectorial [11]. La potencia producida por el generador es inicialmente variable por el voltaje y la frecuencia en corriente alterna, esta corriente alterna es rectificadora a corriente continua, la potencia de la corriente continua es dirigida a cargas o almacenada en baterías y la otra parte es invertida a corriente alterna con voltaje y frecuencia fija, por ejemplo, los imanes están integrados directamente en un rotor cilíndrico de aluminio, la potencia es tomada de la armadura inmóvil, así no hay ninguna necesidad del conmutador, anillos deslizantes o escobillas.

Con el análisis del sistema eléctrico se determina que a la salida del generador y banco de baterías se coloca un convertidor DC/AC que proporcione la corriente de 127/220 volts, alimentando con 12 o 24 volts que se genere por el campo magnético en el rotor, en la figura 6.3, se establece la simulación del inversor de corriente que se establece después del banco de baterías para la distribución de energía, entre el generador y el inversor tenemos un regulador de voltaje, obteniendo una potencia eléctrica de hasta 25 kW para poder alimentar diferentes equipos eléctricos e iluminación [12].

Figura 6.3 Inversor del Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

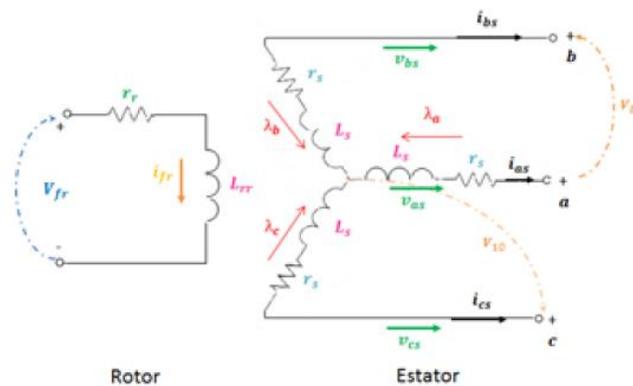
El aerogenerador incorpora un sistema eléctrico con dos funciones diferenciadas:

- La primera función de generación eléctrica propiamente dicha, se lleva a cabo mediante el generador, los contactores e interruptores y, a veces con la posible inclusión de una batería de condensadores para la compensación de energía reactiva.
- La segunda función tiene como objeto el funcionamiento de los equipos auxiliares, como son los motores de orientación, el grupo hidráulico, tomas de corriente, resistencias calefactoras, iluminación general y alimentación del sistema electrónico de control.

3. Modelo del Sistema Eólico

Se analiza los circuitos del rotor y estator del GSIP, en coordenadas de fase abc, recordando que dichos ejes se encuentran espaciados 120 grados eléctricos, las transformaciones matemáticas son usadas para desacoplar variables y, por tanto, facilitar la solución de ecuaciones complejas con coeficientes variables en el tiempo, en el modelo eléctrico se analiza el cambio de energía mecánica a eléctrica para el generador del sistema eólico y, de la energía eléctrica a mecánica para el motor de la torre [12].

Figura 6.4 Generador Síncrono de Imanes Permanentes



Fuente: [11]

Donde:

a, b, c. representan los devanados de fase del estator.
i, v, r, λ , Corriente, Voltaje, Resistencia y enlace de flujo.

En los GSIP los voltajes de fase del estator se obtienen aplicando la ley de los voltajes de Kirchhoff al circuito, como se muestra en la figura 6.4., en el generador síncrono de imanes permanentes.

$$V = -R_e I + \frac{d\Lambda}{dt} \quad (8)$$

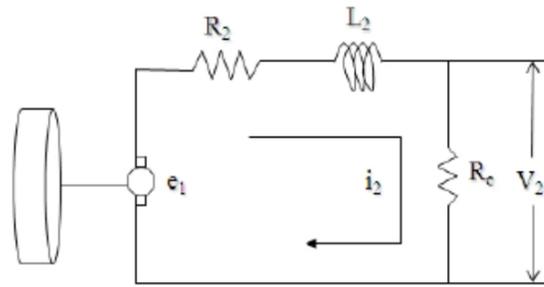
Donde la expresión matricial es:

$$\begin{aligned} V &= [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T \\ R_e &= \text{diag} [r_s, r_s, r_s] \\ I &= [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ \Lambda &= [\lambda_a \ \lambda_b \ \lambda_c]^T \end{aligned} \quad (9)$$

Los enlaces de flujo en cada fase a b c se determinan por la influencia de la corriente que circula en su respectiva fase y por los enlaces de flujo producidos por los imanes permanentes. Así se tiene que la matriz de enlaces de flujo adquiere la siguiente forma:

$$\Lambda = L_s I + \lambda_m \quad (10)$$

Con el desarrollo del generador de imanes permanentes en la figura 6.5 se muestra el modelo eléctrico del sistema eólico, estableciendo los componentes de análisis.

Figura 6.5 Modelo Eléctrico del Aerogenerador

Fuente: [12]

El modelo eléctrico está compuesto por dos ecuaciones diferenciales básicas. La primera de ellas es la relación entre la tensión en las terminales de la bobina y la corriente en ella:

$$V = (-R * I) - \left(\frac{dL(\theta)}{dt} * I \right) - \left(L(\theta) * \frac{dI}{dt} \right) \quad (11)$$

La segunda es la relación del par en el eje y la variación magnética:

$$T_g = \frac{1}{2} * I^T * \frac{dL(\theta)}{dt} * I \quad (12)$$

En ambas ecuaciones se ve reflejada la dinámica de cualquier máquina eléctrica. Pero las inductancias mutuas y propias, dependen del ángulo girando el eje (θ), y este sufre una variación constante. La potencia eléctrica es:

$$P_E = N_e N_p P_{util} \quad (13)$$

Donde:

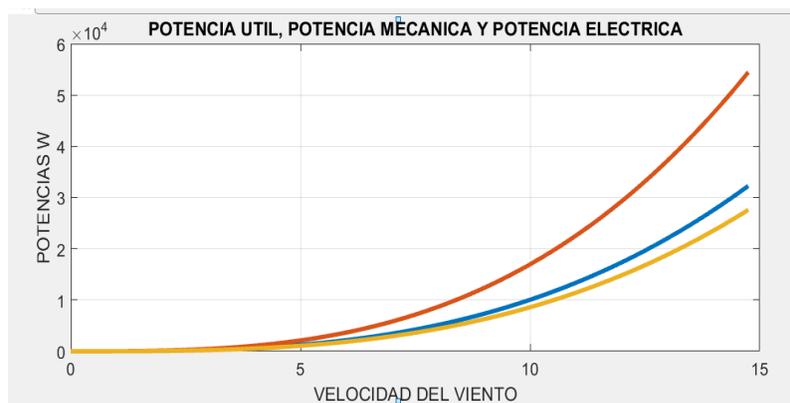
N_e = Eficiencia eléctrica.

N_p = Eficiencia mecánica.

P_{util} = Potencia útil.

La potencia eléctrica se obtiene de la potencia útil del sistema eólico como se muestra en la figura 6.6 [13-14], teniendo la potencia eléctrica como:

$$P_E = \frac{1}{2} C_p \rho_a A V_w^3 N_e N_p \quad (14)$$

Figura 6.6 Potencias del Aerogenerador

Fuente: Elaboración Propia

Se analiza la transformación de Park, la cual convierte las variables del estator trifásico en un nuevo marco de referencia que se mueve con el rotor, cuando la velocidad angular w es constante, podemos analizar estas ecuaciones al definir la matriz de transformación de Park considerando un estator no rotacional y un rotor rotacional T como:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen } \theta & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Debido a que en coordenadas de fase presenta las inductancias que varían con respecto al ángulo θ , que es el ángulo de referencia rotacional y este varía con respecto del tiempo, se utiliza la transformada de Park. En la transformación las inductancias se consideran constantes respecto al marco de referencia giratorio, donde la transformada está basada en la proyección de los valores de tensión y corriente de referencia en los ejes y transformándolos en un eje dinámico cuyo ángulo de referencia corresponde al ángulo de fase de las tensiones y corrientes [15].

De acuerdo a las características del sistema trifásico se tiene que el sistema esta equilibrado, que la suma de tensiones es cero, si el neutro está aislado, la suma de las corrientes es nula. Aplicando la transformación de Park a las matrices de voltajes, corrientes y flujos se tiene:

$$\begin{aligned} V_{qds}^r &= T V \\ i_{qds}^r &= T I \\ \Lambda_{qds}^r &= T \Lambda \end{aligned} \quad (16)$$

Con estas ecuaciones se determinan las ecuaciones diferenciales para i_{qds}^r

$$\frac{di_{qs}^r}{dt} = - \frac{r_s}{L_{ls} + \frac{3}{2}L_m} i_{qs}^r + \frac{\lambda_m}{L_{ls} + \frac{3}{2}L_m} \omega - i_{ds}^r \omega_r \quad (17)$$

$$\frac{di_{ds}^r}{dt} = - \frac{r_s}{L_{ls} + \frac{3}{2}L_m} i_{ds}^r + i_{qs}^r \omega \quad (18)$$

Donde el marco de referencia debe sustituir la velocidad angular eléctrica w , por la velocidad angular del rotor $w_{rm} = \frac{2}{p} w$. La dinámica de esta ecuación considera la segunda ley de Newton a través de la ecuación diferencial:

$$\frac{dw_{rm}}{dt} = - \frac{3p\lambda_m}{4J} i_{qs}^r - \frac{B}{J} w_{rm} + \frac{T_{pm}}{J} \quad (19)$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = w_{rm} \quad (20)$$

Donde:

p Número de polos.

B Coeficiente de fricción viscosa.

w_{rm} Velocidad mecánica.

θ_{rm} Desplazamiento mecánico.

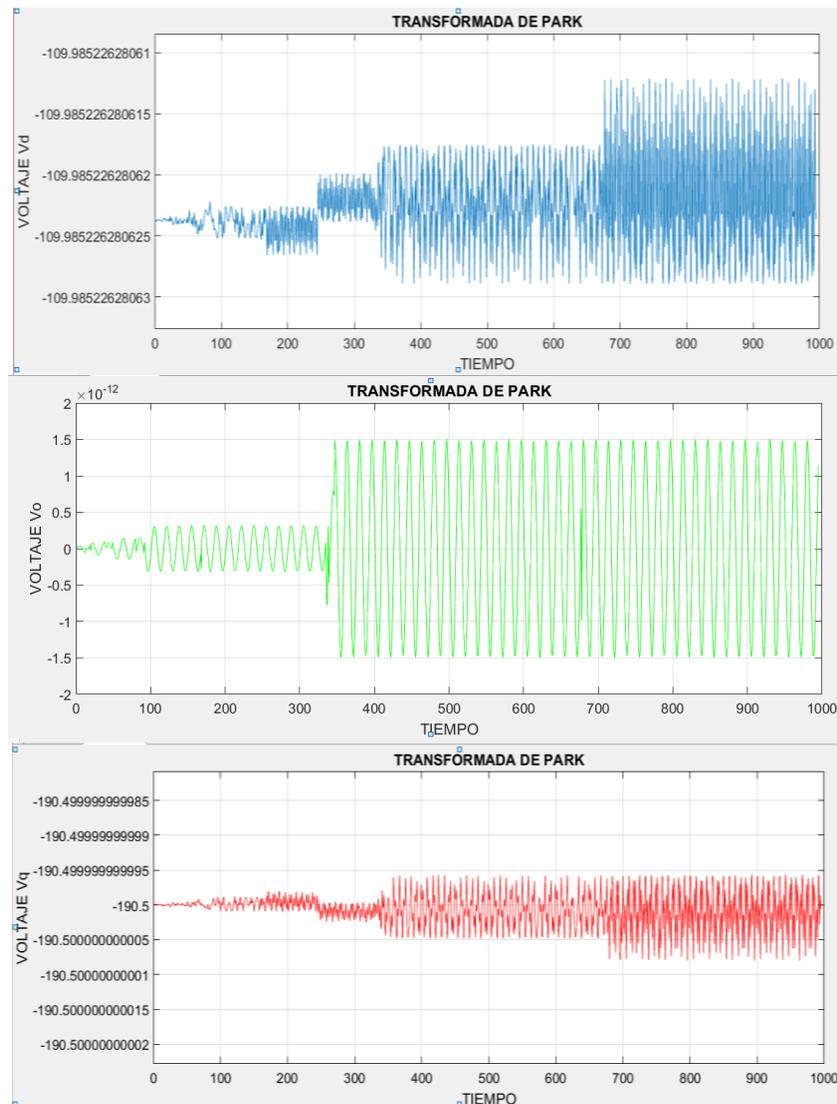
T_{pm} Par generado en el motor.

El par producido por el Generador:

$$T_e = \frac{3p\lambda_m}{4J} i_{qs}^r \quad (21)$$

Por lo que las ecuaciones 17 a 20 conformaran el modelo dinámico del generador del aerogenerador y en la figura 6.7 muestra la transformada de Park para voltajes [13-14].

Figura 6.7 Modelo Eléctrico del Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

Los sistemas aislados de generación de energía eléctrica a través de la eólica se utilizan para alimentar cargas específicas como puede ser una carga para el sector residencial o comercial, las cuales típicamente son de valores fijos considerando una carga principal de 25 kW. Dependiendo de la potencia que se genere y que se pueda transmitir en el sistema de engranajes, donde se presenta el valor máximo de potencia, de acuerdo a la velocidad y al torque donde a la salida es convertida a energía eléctrica, después de ser transformada en el medio de transmisión de potencia.

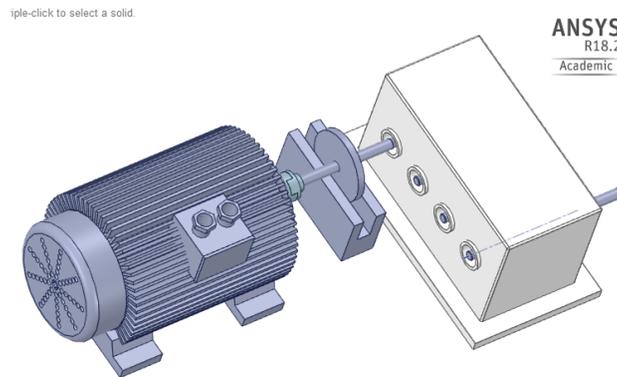
Las maquinas síncronas de imanes permanentes son empleadas en aplicaciones de baja potencia. Son ideales para aplicaciones donde se requiera alta relación de par e inercia, para conseguir equilibrio de aceleraciones, alta relación de potencia, peso y alto rendimiento.

Resultados

La simulación permite predecir el comportamiento de sistemas, diseñar y operar los sistemas de ingeniería, donde se analiza el sistema eólico en sus condiciones de funcionamiento y se divide en varias etapas. Formulación de la simulación, Definición del sistema eólico, Modelado del Sistema, Desarrollo de la simulación, Verificación y Validación, Diseño de Prototipo y Ensayos.

Las ecuaciones del modelo del generador eléctrico pueden ser implementadas en una simulación que usa voltajes como entrada y corrientes como salida donde la simulación del sistema eléctrico se analice desde la parte mecánica, en la figura 6.8, se muestra la simulación del generador, donde se establecerán las variables dentro del programa, las entradas más importantes dentro del generador son los voltajes de fase abc del estator, y los parámetros a introducir, la excitación que proveen los imanes permanentes y el par mecánico aplicado al rotor.

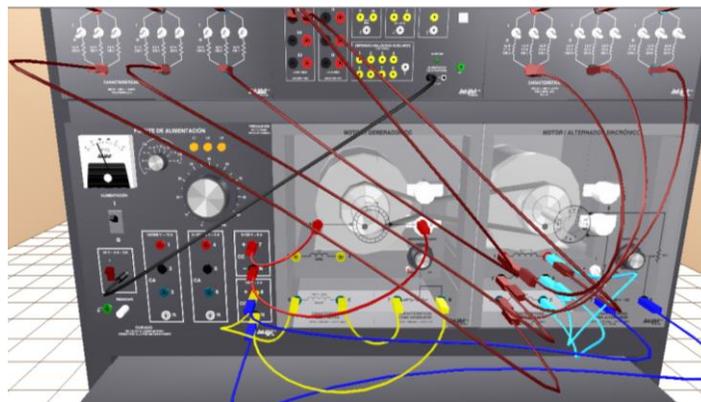
Figura 6.8 Modelo Eléctrico del Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

Para la realización de pruebas se desarrollaron análisis a través del simulador virtual Lab-Volt que es un laboratorio tridimensional, las características del generador alternador, jaula de ardilla o generador de imanes permanentes a considerar para el sistema eólico, el cual es alimentado en esta prueba por un dínamo de cuatro cuadrantes o fuente de alimentación, considerado como el simulador de la velocidad del viento en sus diferentes valores y estableciendo el comportamiento del sistema eléctrico dentro del sistema eólico, en la figura 6.9, se establece los elementos de prueba para conocer los parámetros eléctricos de voltaje, corriente y potencia para establecer en el sistema eólico, con estas simulaciones se pasó a las pruebas de funcionamiento, con equipo de laboratorio de potencia con el que se cuenta, para conocer el comportamiento eléctrico del sistema eólico.

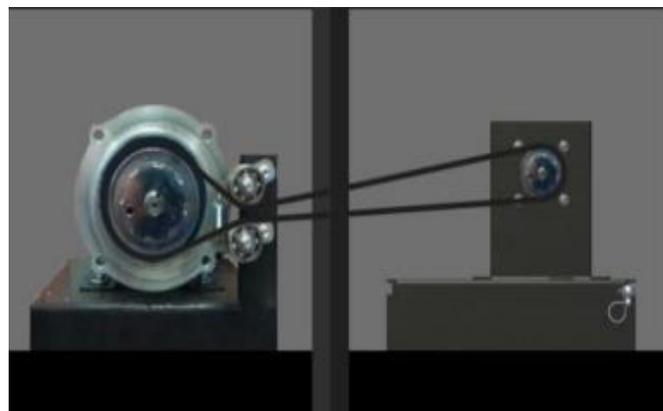
Figura 6.9 Simulación LAB-VOLT del Generador Eléctrico para el Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

Se establecen las pruebas de funcionamiento para un generador de imanes permanentes y observar el comportamiento del sistema, para lo cual se acopla el dínamo que establecerá el comportamiento simulado del viento y conectado el generador de imanes permanentes, como se muestra en la figura 6.10.

Figura 6.10 Prueba de Funcionamiento del Generador Eléctrico para Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

Con el equipo se establece la conexión y el funcionamiento de los componentes del sistema eólico para el generador eléctrico, en estas pruebas se determina el comportamiento de la corriente, el voltaje, la potencia y el torque eléctrico, estableciendo que se obtiene en la pantalla valores de velocidad y potencia eléctrica, que pueden ser variadas para el análisis desarrollado, como se muestra en la figura 6.11.

Figura 6.11 Pruebas del Sistema Eléctrico del Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

Además, con la simulación del convertidor de corriente se desarrolló la construcción del inversor de voltaje que utiliza circuitos electrónicos para hacer que el flujo de la corriente continua cambie de dirección de forma periódica haciéndola similar a la corriente alterna. El inversor además emplea una serie de filtros para hacer que estos cambios de dirección sean suaves y regulares de forma que la energía eléctrica resultante puede ser usada en la mayoría de dispositivos eléctricos, los componente para la obtención de valores de entrada de 12 volts, este valor será el que nos entregue el generador y salida del convertidor de 220 volts entre fases, los cuales alimentaran equipos para esta capacidad, en la figura 6.12 se muestra el sistema del convertidor con una salida de 220 volts entre fases y 127 volts para fase neutro.

Figura 6.12 Modelo del Convertidor Eléctrico del Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia

Conclusiones

La simulación del sistema eólico permite establecer los elementos de análisis en su parte mecánica para conocer las variables que serán importantes en la transformación de energía mecánica a energía eléctrica y las variables a considerar como son el voltaje, la corriente, la potencia y el flujo de energía.

El desarrollo del análisis eléctrico permite establecer los parámetros y las variables del sistema que se controlaran a través de un análisis de Park y el desarrollo del modelo eléctrico, siendo de suma importancia los elementos de diseño y la ingeniería para conocer todas las características que hacen funcionar, mover y estructurar al aerogenerador para la generación de energía eléctrica y su simulación. Los elementos eléctricos y el generador tendrán las simulaciones realizadas en Proteus y Lab-Volt para establecer las características del comportamiento del sistema y pasar a una etapa de prototipo.

Se analiza el comportamiento del equipo para que no ocurran fallas eléctricas que se contemplan en el proyecto y las alternativas de solución. Se establece el control comparando las respuestas en los diferentes casos y estableciendo que no existan cambios en la velocidad angular, dando como resultado el controlar la potencia eléctrica.

Con la realización de programas y de la simulación obtenemos el comportamiento del sistema eólico, logrando los argumentos para el correcto funcionamiento del aerogenerador mostrado. 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 el funcionamiento y la operación del aerogenerador.

Referencias

- [1]. 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.
- [2]. Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, Ed. Mc Graw Hill, Novena Edición.
- [3] Ferdinand P. Beer, E Russell Johnston, Jr. Mecánica de Materiales, Tercera edición, Mc Grall Hill, 2004.
- [4] Ferdinand P. Beer, E Russell Johnston, Jr. Mecánica Vectorial para Ingenieros, Octava edición, Mc Grall Hill, 2007.
- [5] Hamilton H. Mabie, Charles F. Reinholtz, Mecanismos y Dinámica de Maquinaria, editorial Limusa Wiley, segunda edición.
- [6]. William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly, Análisis de Circuitos en Ingeniería, cuarta edición, Mc Gral Hill.
- [7]. Julio Usaola García, Ma. Ángeles Moreno López de Saá, Circuitos Eléctricos, Ed. Prentice Hall, 2003.
- [8]. Ansys, Inc. Manual ANSYS 18.2, 2017.
- [9]. Ansys, Inc. ANSYS FLUENT USER’S GUIDE, Release 13.0, November 2010.
- [10]. Ing. Gilberto Enríquez Harper, Generadores, Transformadores y Motores Eléctricos, Ed. Limusa 2004.
- [11]. Villanueva López, Miguel, Ingeniería de la Energía Eólica, Alfa Omega 2012.
- [12]. German Tojeiro Calaza, Proteus, Simulación de Circuitos Electrónicos y Microcontroladores. Ed. Marcobo, 2008.
- [13]. William Bolton, Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en la ingeniería Mecánica y Eléctrica, editorial Alfaomega, quinta edición, 2013
- [14]. Amos Gilat, MATLAB. Ed. Reverte, 2005.
- [15]. Enrique Pino Bermudes, Fernando Matía Espada, Fundamentos de Control con MATLAB. Ed. Pearson, 2012.
- [16]. José Manuel Aller, Maquinas Síncronas, Universidad Politécnica Saleciana, 2014.