



Conference: Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables -  
Mantenimiento Industrial - Mecatrónica e Informática

*Booklets*



RENECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar  
DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

**Title:** Modelo, simulación y control del sistema eléctrico y electrónico de un sistema eólico de baja potencia

**Author:** Alejandro, LINARES-ENRÍQUEZ, Edgar, REA-CABRERA

**Editorial label ECORFAN:** 607-8534  
**BCIERMMI Control Number:** 2018-03  
**BCIERMMI Classification (2018):** 251018-0301

**Pages:** 32  
**RNA:** 03-2010-032610115700-14

**ECORFAN-México, S.C.**  
244 – 2 Itzopan Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: contacto@ecorfan.org  
Facebook: ECORFAN-México S. C.  
Twitter: @EcorfanC

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

**Holdings**

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic Republic
Spain	El Salvador	of Congo
Ecuador	Taiwan	Nicaragua
Peru	Paraguay	

1. *Introducción.*
2. *Desarrollo.*
3. *Modelado del Sistema Eólico.*
4. *Resultados.*
5. *Conclusiones.*
6. *Referencias.*

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

## **I. Introducción.**

La energía eólica es hoy en día una de las tecnologías renovables más competitivas que nos brinda los mayores beneficios y posibilidades

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

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

La propuesta del sistema eólico es para bajas velocidades de viento con un valor máximo de 12 m/s, que es un viento moderado.

Es necesario en el lugar de la instalación y el consumo de energía kWh que se establezca.

En el desarrollo del proyecto se realiza el análisis de los componentes del aerogenerador dentro del diseño, su simulación y la conversión de energía.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

Se obtiene el 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, para establecer las características del sistema eólico

Este sistema desarrolla una potencia de hasta 25kW donde su aplicación es en inmuebles de baja capacidad o carga.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

## II. 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

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.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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 ésta. Mediante la ley de la conservación de la masa.

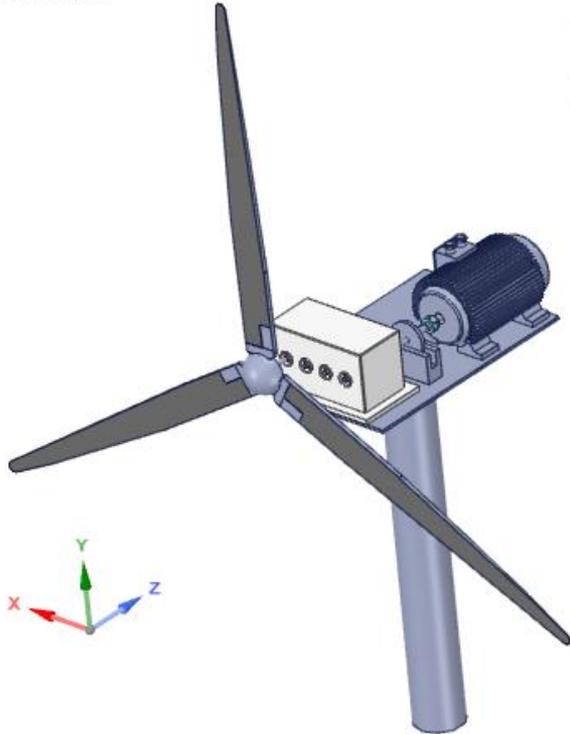
$$\dot{m} = \rho_a A_1 V_1 = \rho_a A V_w = \rho_a A_2 V_2$$

Potencia útil

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

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

**ANSYS**  
R18.2  
Academic



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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

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

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:  $T = \int \rho (\tau dA)$ .

$$\theta = \frac{TL}{GJ}$$

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

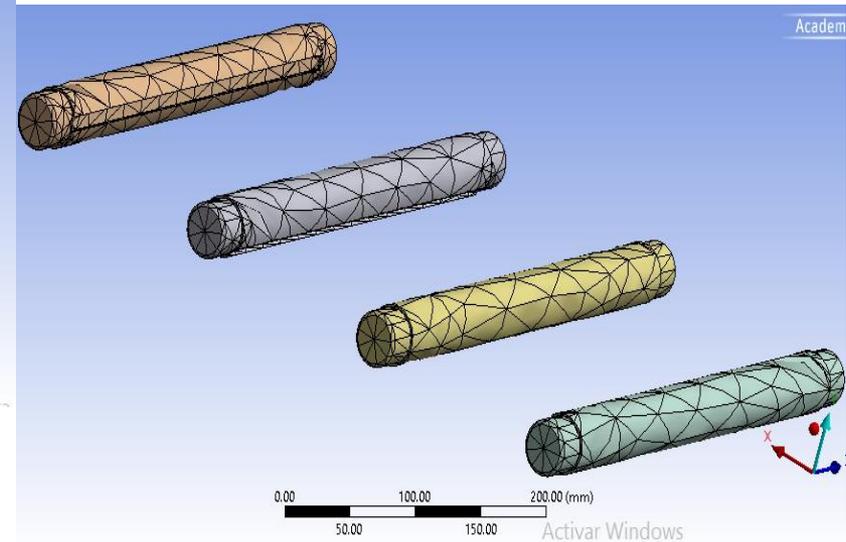
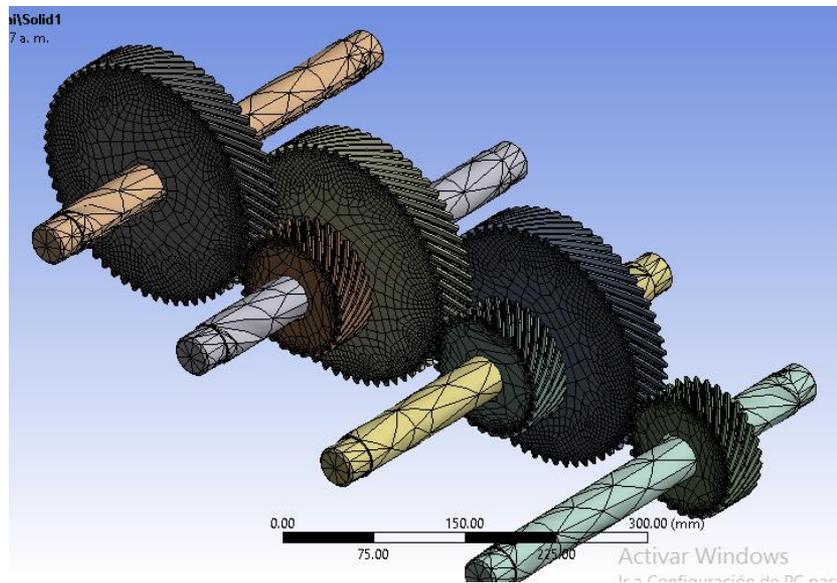
Para el análisis se considera que sobre los ejes actúan pares de torsión y cargas, el material obedece la ley de Hooke, además de considerar el análisis del sistema sometido a torsión, como sistema estáticamente determinado o estáticamente indeterminado y, considerar el análisis a través de sistemas 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:

$$P = Tw$$

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

Se desarrolla el sistema mecánico con el análisis del elemento finito con el mallado de ejes y engranes.



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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 y la segunda ley de Kirchhoff.

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.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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.

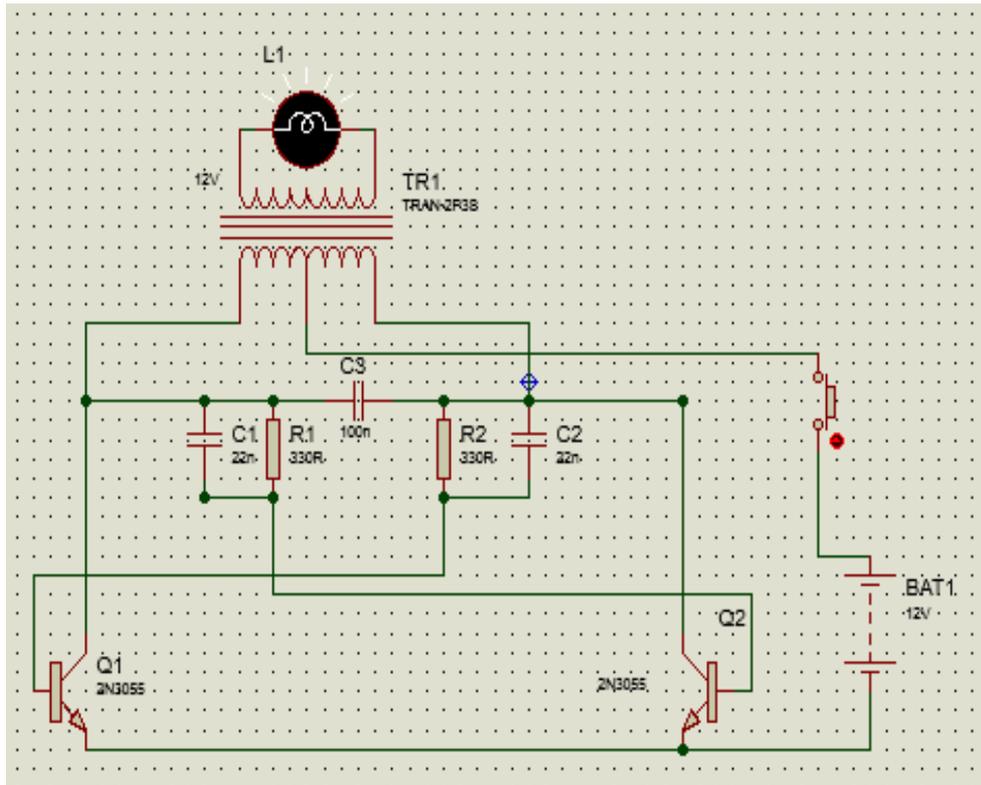
Un generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial consiste en que el estator posee las bobinas y el rotor consiste en dos platos separados los cuales poseen los imanes.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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.

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.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018



El aerogenerador incorpora un sistema eléctrico con dos funciones.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

- a) 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.
- b) 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.

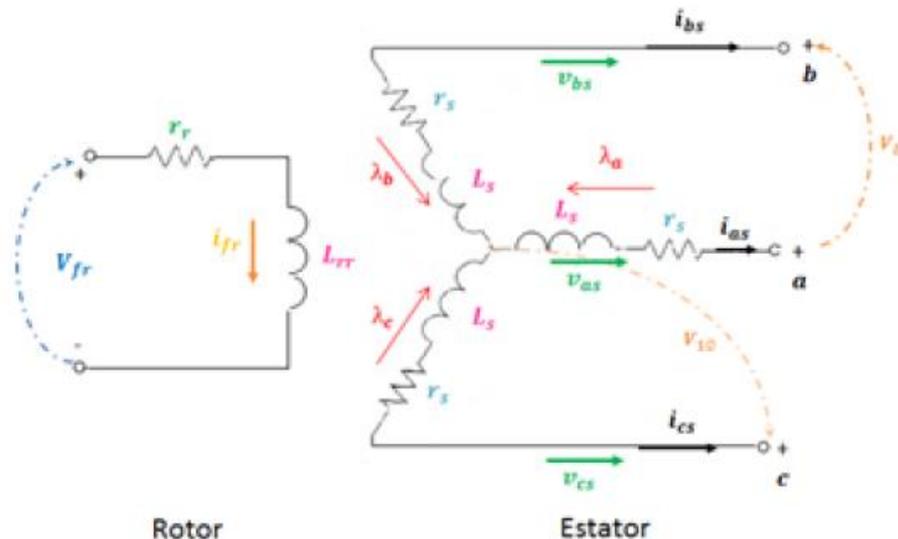
Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

### **III. 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.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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

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

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

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

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

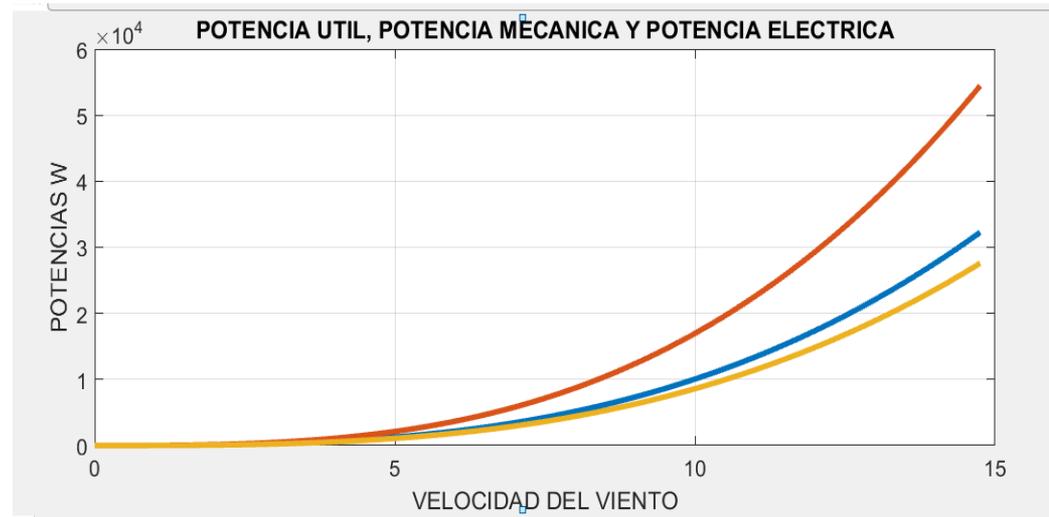
En ambas ecuaciones se ve reflejada la dinámica de cualquier máquina eléctrica. Pero las inductancias mutuas y propias, dependen del ángulo girando el eje ( $\theta$ ), y este sufre una variación constante.

La potencia eléctrica es

$$P_E = N_e N_p P_{util}$$

La potencia eléctrica se obtiene de la potencia útil del sistema eólico como

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



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

Se analiza la transformación de Park

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

Debido a que en coordenadas de fase presenta las inductancias que varían con respecto al ángulo  $\theta$ , que es el ángulo de referencia rotacional y este varía con respecto del tiempo, se utiliza la transformada de Park.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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:

$$V_{qds}^r = T V$$

$$i_{qds}^r = T I$$

$$\Lambda_{qds}^r = T \Lambda$$

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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:

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

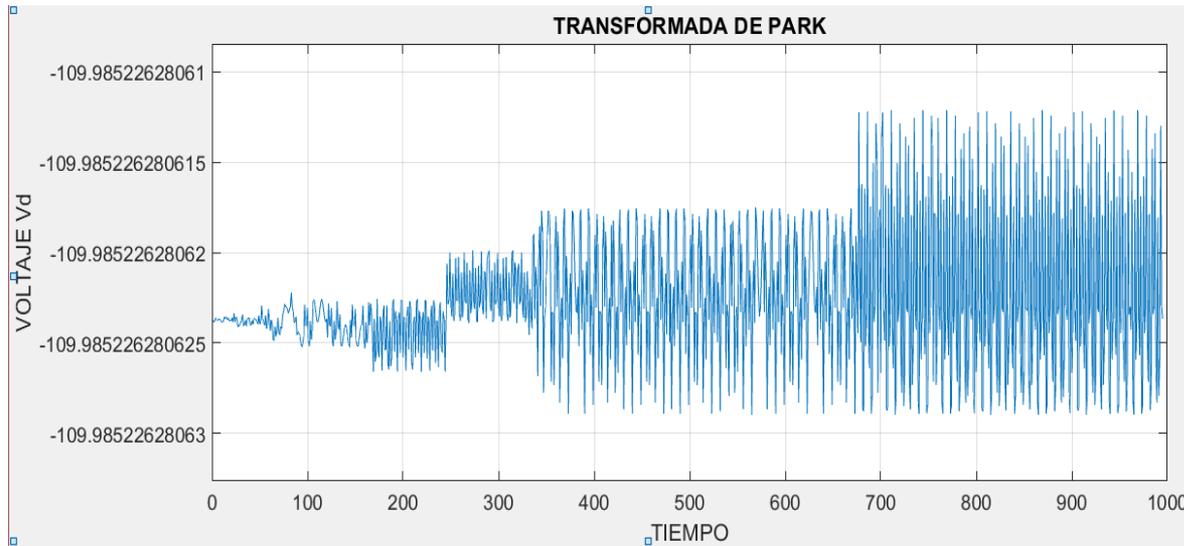
$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = w_{rm}$$

El par producido por el Generador:

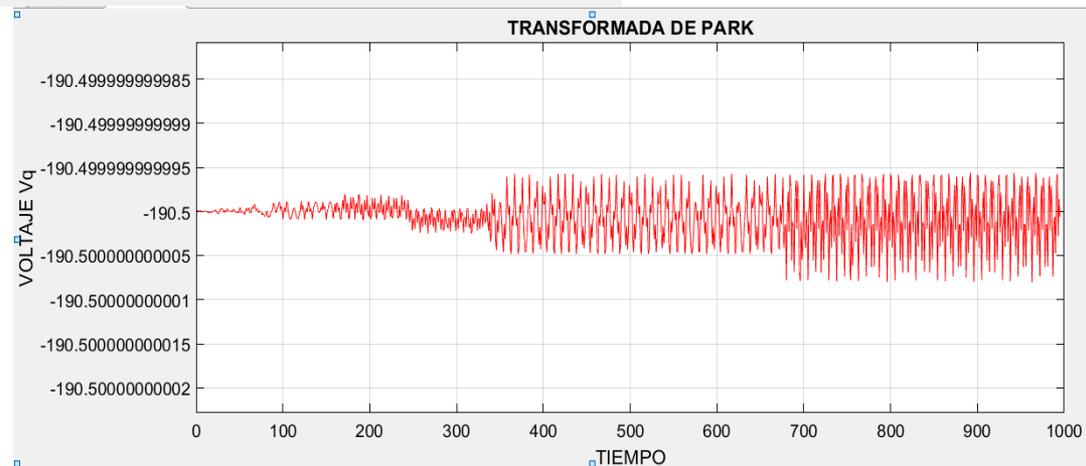
$$T_e = \frac{3p\lambda_m}{4J} i_{qs}^r$$

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

Por lo que las ecuaciones conformaran el modelo dinámico del generador del aerogenerador y se muestra la transformada de Park para voltajes



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

Los sistemas aislados de generación de energía eléctrica a través de la eólica, se utilizan para alimentar cargas específicas como una carga para el sector residencial o comercial. 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.

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

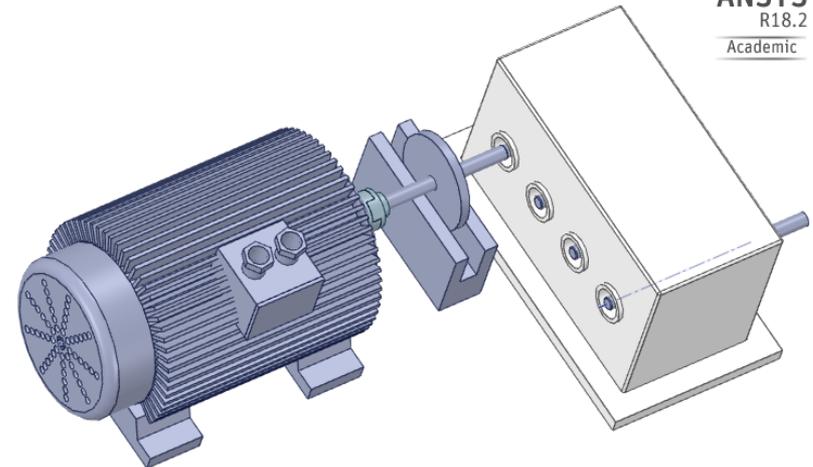
Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

## Resultados.

Se muestra la simulación del generador.

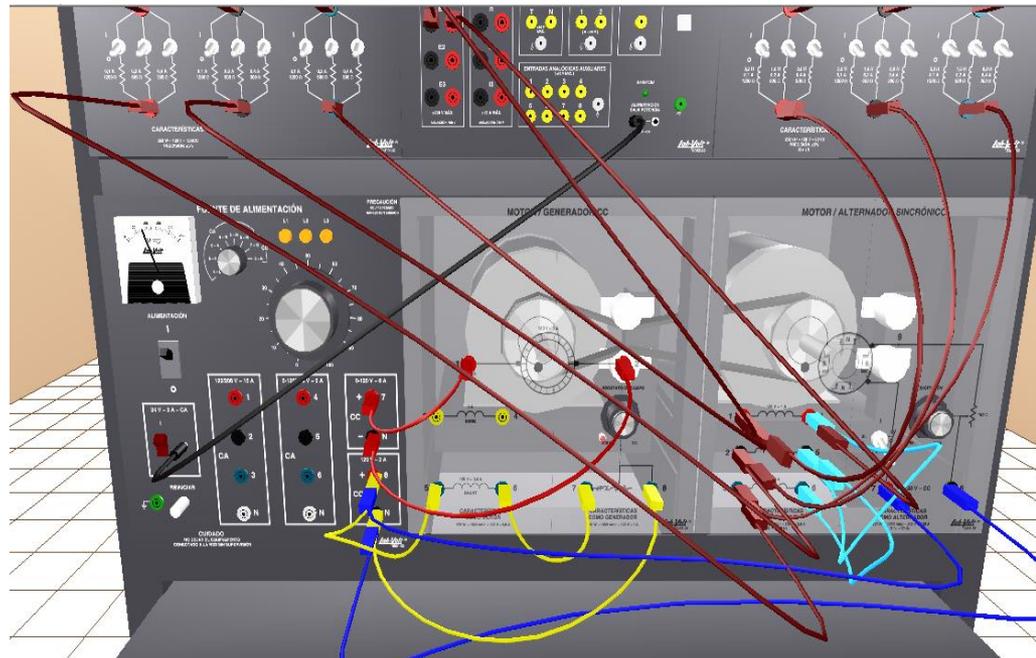
Para la realización de pruebas se desarrollaron análisis a través del simulador virtual Lab-Volt que es un laboratorio tridimensional, las características del generador alternador, jaula de ardilla o generador de imanes permanentes a considerar para el sistema eólico.

iple-click to select a solid.



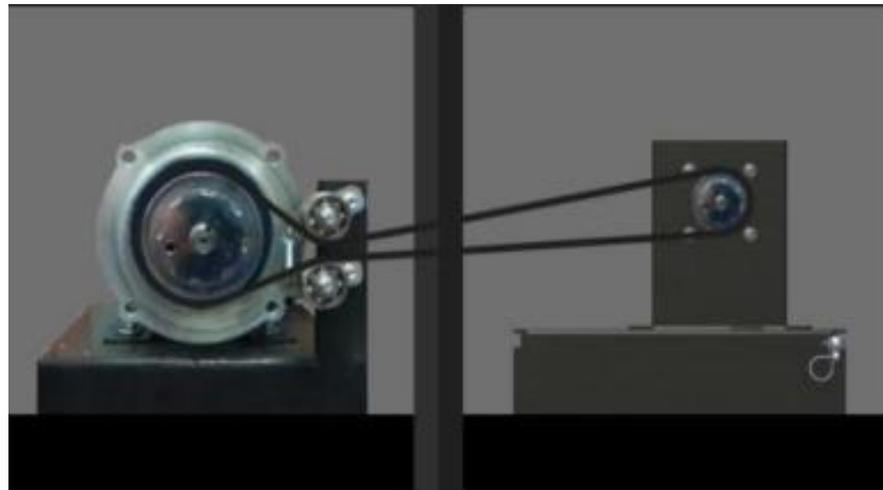
Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

Se establece los elementos de prueba para conocer los parámetros eléctricos de voltaje, corriente y potencia para establecer en el sistema eólico.



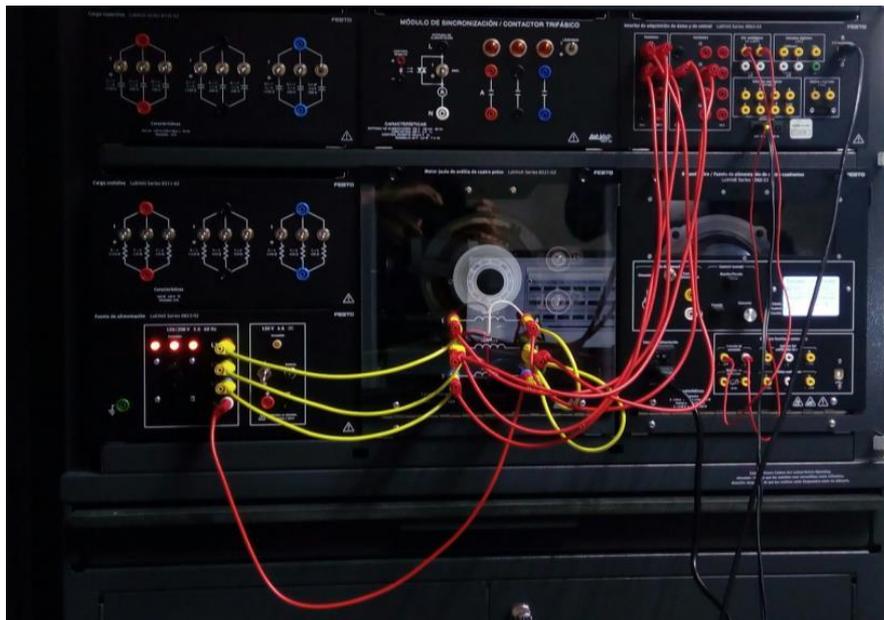
Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

Con el equipo se establece la conexión y el funcionamiento de los componentes del sistema eólico para el generador eléctrico, se determina el comportamiento de la corriente, el voltaje, la potencia y el torque eléctrico, estableciendo los valores de velocidad y potencia eléctrica.



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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.



Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

## 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 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.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018

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 desarrollo.

Santiago de Querétaro, Qro., 25 y 26 de octubre del 2018



**ECORFAN®**

**© ECORFAN-Mexico, S.C.**

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/](http://www.ecorfan.org/) booklets)