

Prototipo de sistema de alimentación para equipos portátiles aprovechando la energía eólica

Power system prototype for laptops harnessing wind energy

Óscar M. Velásquez B.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
omvelasquezb@correo.udistrital.edu.co

Este artículo presenta un modelo de generación y regulación de energía eléctrica para alimentar dispositivos con potencia igual o menor a 80 W. El sistema flexible de suministro de energía eléctrica es una alternativa para suplir necesidades de alimentación de equipos o dispositivos de baja potencia, por ejemplo, equipos móviles. Este sistema aislado de energía eléctrica está conformado por un controlador de carga de baterías, un banco de baterías, convertidor DC/AC, un rectificador de onda completa y un generador eléctrico de imanes permanentes de 10 W - 12 V. En este trabajo se documenta los criterios necesarios para la construcción del prototipo con simulación de las partes del generador con un software de elementos finitos. Además, se describe las pruebas de laboratorio a los diferentes componentes del prototipo.

Palabras clave: Aerogenerador, convertidor de potencia, regulación de voltaje, viento

This paper presents a generation model and electrical energy regulation to supply devices up to 80 W. The electrical power flexible system is an alternative to supply needs of power for low-power devices, such as mobile equipment. This stand-alone power system is comprised of a battery charge controller, a battery bank, a DC/AC converter, a full wave rectifier and a permanent magnet generator 10 W - 12 V. In this work has been documented the criteria necessary for the construction of the prototype with simulation of generator parts in a finite element software. In addition, laboratory tests were made to the components of the prototype.

Keywords: Power converter, voltage regulation, wind, wind turbine

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 2, 2016

Fecha aceptación del manuscrito: Junio 6, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/756>

Cómo citar: Velásquez, O. (2016). *Prototipo de sistema de alimentación para equipos portátiles aprovechando la energía eólica*. Revista Tekhnê, 13(1), 41-56.

Introducción

El uso de los computadores, reproductores y celulares dentro de los espacios de interacción social es cada vez mayor. Ya sea para el caso uso de la comunicación, de forma académica o simplemente para actividades de ocio.

Los equipos móviles se descargan rápida y continuamente, el tiempo de servicio es proporcional al uso del equipo. Los smartphones, por ejemplo, utilizan baterías recargables electro-químicas. Estas pueden ser de iones de litio (Li-ion) o de polímeros de litio (Li-po). Una desventaja de la tecnología de esta clase de baterías es su corta duración con los dispositivos móviles cuando se usan forma continua (Rocabado, Díaz, y Cadena, s.f.).

El manejo diario y excesivo de estos equipos portátiles genera un consumo apreciable (energético y monetario). Esto permite pensar en la necesidad de una fuente de alimentación versátil, de bajo costo y fácil acceso. Ésta es una razonable inversión que se puede recuperar a corto plazo y ganancia por varios años.

Actualmente los usuarios de equipos portátiles dependen de fuentes de tensión de la red local (red pública) para alimentar dispositivos portátiles. Muchas veces, los puntos de conexión eléctricos no son accesibles o son facturados a otro usuario.

El acceso a fuentes eléctricas a partir de energías renovables no es sencillo para el usuario común. Cuando se hace referencia a mecanismos de energía limpia, estos se asocian con altos consumos de energía en zonas aisladas donde el presupuesto de inversión se justifica.

Sin embargo, si se habla de pequeños prototipos y micro-generación se puede optar por un sistema de alimentación, por ejemplo, basado en energía eólica. De lo anterior, sería una forma factible de suplir la necesidad de cargar las baterías de equipos portátiles.

En la tabla 1 clasifica la potencia eléctrica para la generación de energía por medio de sistemas eólicos, foto voltaicos y mixtos, en adición, proporciona algunos lugares donde se presenta estos sistemas de energía o como sistemas mecánicos.

Un sistema flexible de suministro de energía eléctrica, desde lo más básico, es una agrupación de elementos que tiene como objetivo llevar energía eléctrica hasta un lugar dado. Para esto, se debe generar, transportar y distribuir la energía eléctrica hasta el usuario final. Además, el sistema está dotado de dispositivo de regulación, protección y visualización.

Visto de esta manera, cada una de las partes debe ser dimensionada y acoplada con las características y especificaciones de uso (potencia, tensión eléctrica, corriente, entre otras). Por esta razón, y para darle un objetivo a la energía eólica, se modela a modo de generador y una turbina para formar un aerogenerador.

Por separado a la generación, se implementa elementos adicionales para un control y regulación del almacenamiento de la energía eléctrica a un banco de baterías. Este banco de baterías tiene como propósito, proporcionar la potencia suficiente para el recargar las baterías de los dispositivos móviles.

Como resultado, para suministrar esta energía eléctrica a los usuarios de una forma convencional (salida de tomacorriente), se adhiere un dispositivo para la transformación de energía a la salida del sistema.

Este artículo expone la forma en que se construyó el modelo de generación eólica más adecuado, según los autores, para la necesidad antes descrita. En la Fig. 1 muestra las partes del prototipo de un sistema flexible de suministro de energía eléctrica.

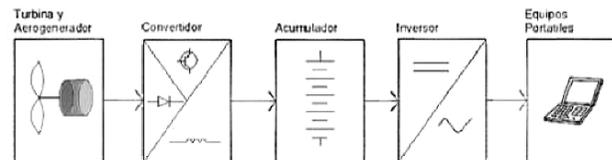


Figura 1. Modelo del sistema flexible de suministro de energía eléctrica.

Formulación del problema

El grupo de investigación Arquitecturas Modernas para Sistemas de Alimentación (ARMOS) y el Semillero de Investigación en Electrónica de Potencia de la Universidad Distrital (SIEPOT) están interesados en desarrollar prototipos de generación de energía, implementando sistemas renovables. En este sentido, ha mirado como posible nicho de mercado el consumo de energía eléctrica por parte de equipos electrónicos portátiles. Una posible evolución de este tipo de sistemas contempla los kioscos de carga para vehículos eléctricos.

Un sistema de alimentación, por ejemplo, basado en energía eólica, es una forma factible de suplir la necesidad de cargar las baterías de equipos portátiles, y constituye un desarrollo tecnológico importante para la Universidad Distrital como ente promotor de la investigación de procesos académicos reflexivos y del cuidado del medio ambiente.

La necesidad de nuevos puntos de conexión para la carga de las baterías de los equipos portátiles dentro de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital, si bien no es una obligación de la Universidad, si es claro que mejora el desempeño académico de su comunidad. Esto ha motivado el interés por innovar y apropiar tecnología para la implementación de prototipos novedosos para el suministro de energía que no dependan de la red local. Actualmente, la Facultad Tecnológica no cuenta con este tipo de sistemas, a pesar las investigaciones realizadas.

Denominación		Potencia [Kw]	Utilización	
Baja	Muy baja	Microaerogeneradores	<1	Embarcaciones, sistema de comunicación, refugios de montaña, iluminación, etc.
		Miniaerogeneradores	1 - 10.	Granjas, viviendas aisladas(Sistemas Eólicos-Fotovoltaicos, bombeo,etc.
			10 -100.	Comunidades de vecinos, PYMES (sistemas mixtos EODisel, drenaje, tratamiento de aguas, etc.
Media		100 -1000.	Parques eólicos (Terreno complejo)	
Alta		1000 - 10000.	Parques eólicos (Terreno llano, mar adentro)	
Muy alta		>10000.	En fase de investigación y desarrollo, requiere nuevos diseños y materiales no convencionales. No antes del año 2010.	

Tabla 1
Clasificación de aerogeneradores para producción de energía eléctrica vs. Potencia eléctrica (Hernández, 2010).

Metodología

En la actualidad se puede encontrar muchos fabricantes de equipos portátiles, por ejemplo de la laptop, y sin embargo, no existen estándares industriales para las fuentes de alimentación, al hablar de la energía necesaria para tener las baterías cargadas de los equipos portátiles.

Unos dispositivos móviles pueden trabajar a diferentes niveles de tensión que otros, sin mencionar la corriente necesaria para cargar sus baterías, en consecuencia, se toma la decisión de dejar la salida del sistema flexible de forma convencional de tomacorriente, de esta manera, los usuarios puedan acceder a la energía con sus respectivos adaptadores, los cuales vienen con los dispositivo móviles como el caso de los smartpone.

TURBINA:

Para empezar con un modelo de generación de energía eléctrica es necesario hacer una investigación acerca de cuánta es la potencia de suministro para la carga. En este caso, la potencia necesaria para cargar las baterías de los equipos portátiles.

Dado que la potencia activa para las baterías es:

$$P_d = V * I. \tag{1}$$

- P_d :Potencia de diseño en vatios [W].
- V : Tensión de salida especificada en los adaptadores en [V].
- I : Corriente nominal del adaptador en [A] o [mA].

Sin embargo, esta potencia varía en el día, de acuerdo con las tareas asignadas o el estado de la máquina.

En la tabla 2 se puede observar diferente valores de potencia para algunos tipos de notebooks de acuerdo al

estado de la máquina, si está apagada y conectada, en uso máximo, en uso moderado, en estado suspendido o al cargar la batería. Por esta razón se escoge la potencia máxima de esta tabla como potencia requerida P_R para dimensionar el generador y la turbina eólica.

Con esta información y cálculo, se llega en conclusión que la batería de un computador portátil puede variar de 30 - 80 [W] (PENN, s.f.) , se adoptó el valor de 80W para el modelo del sistema de alimentación.

Sin embargo, el perfil del generador en dimensiones longitudinales debe ser relativamente pequeño para su implementación, para ello se llega a un acuerdo de 10W como potencia del generador P_g y, posteriormente, con la ayuda del banco de baterías llegar a la potencia requerida.

Para que la potencia necesaria sea acumulada, se elige un banco de baterías con una potencia superior o igual a la potencia de diseño P_d .

Para la turbina, se puede decir que la ecuación de la potencia de viento está dada por (Neumann, 2002):

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A^2 * V^3 \tag{2}$$

Donde:

- P : Potencia [W]
- A : Área del aerogenerador en contacto con el viento [m²]
- ρ : Densidad del aire [kg/m³]
- V : Velocidad del viento [m/s]

De la ecuación 2, se puede inferir que la variable con mayor peso es la velocidad del viento V . Además, éste es valor versátil en todo el día.

La densidad del aire es constante de un valor de 1kg/m³ para un sitio como Bogotá y la velocidad está entre 3[m/s] (Aguilar, Arias, Guasca, y Lamus, 2010) como promedio.

Notebook aproximada / Netbook de consumo de energía en vatios						
Modelo	Especificaciones básicas	Off (enchufado)	Boot (pico)	El uso moderado (rango)	Dormir	La carga de la batería (encendido)
Apple MacBook Pro De 13 pulgadas "Retina" (Mediados comprado 2012)	2,5 GHz Core i5, 8,0 GB de RAM, 256 GB unidad de estado sólido, OS X 10.8.3 (sucio)	1	50	49-53	1	53
Apple MacBook Pro 13 pulgadas (Mediados comprado 2009)	2.53 GHz Core 2 Duo, 4,0 GB de RAM, 256 GB unidad de estado sólido, Mac OS 10.5.8 (sucio)	1	52	58-60	1	56-60
Dell XPS 12 12,5 pulgadas (Comprado a finales de 2012)	2.6 GHz Core i5, 8,0 GB de RAM, 256 GB unidad de estado sólido, Windows 8 Pro de 64 bits (sucio)	1	21	38-40 *	1	66-71
Dell Latitude E4200 12 pulgadas (Comprado a finales de 2008)	1,4 GHz Core 2 Duo, 3,0 GB de RAM, 128 GB unidad de estado sólido, Windows Vista Business de 64 bits (sucio)	1	48	38-40	1	66-71 *
Dell Latitude XT2 XFR 12 pulgadas (Probado a principios de 2010)	1,6 GHz Core 2 Duo, 2,0 GB de RAM, 64 GB de disco de estado sólido, Windows Vista Business de 32 bits (limpia)	1	37	28-32	1	49
Dell Inspiron Mini 10 10 pulgadas (Comprado a finales de 2009)	1,6 GHz Atom, 1,0 GB de RAM, 160 GB de disco duro, Windows 7 Ultimate de 32 bits RTM (limpia)	1	21	19-21	1	34-35
Lenovo ThinkPad X100e 11,6 pulgadas (Probado a principios de 2010)	1.6 GHz Athlon, 3,0 GB de RAM, 250 GB de disco duro, Windows 7 Professional de 32 bits RTM (limpia)	1	21	19-21	1	68-70

Tabla 2
Consumo de potencia en Vatios(PENN, s.f.)

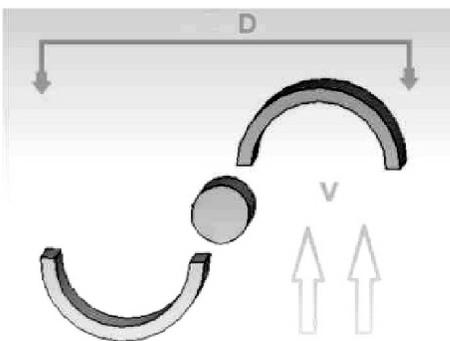


Figura 2. Modelo de turbina Savonius.

Ésta no es la única información necesaria para la construcción de la turbina, existe unos acoplamientos (uniones), características en que la energía mecánica

se convierta en energía eléctrica, las cuales se llamará eficiencias.

La primera de ellas existe en el modelo de la turbina ϵ_1 :, una pérdida de potencia mecánica que se llama eficiencia. Para esto, se consulta la Tabla 3 donde describe las eficiencias correspondiente a los tipos de construcción para algunos modelos de turbinas eólicas. Como perfil de la turbina un modelo apropiado, concorde con la construcción, sería un turbina tipo Savonius con una eficiencia de 20 % o 0,2 en por unidad (p.u.).

Las ventajas que presenta un generador de tipo Savonius son (Murillo, 2012):

- Su rotor es de eje vertical, por esto, no necesita disponer de un mecanismo de orientación.
- Acepta mucho mejor los vientos turbulentos que las turbinas que funcionan por sustentación.
- Se frena automáticamente al llegar a cierta velocidad límite.

La segunda eficiencia se encuentra en la unión que hay entre la turbina y el eje del generador ϵ_2 :. Siendo optimistas

MÁQUINAS EÓLICAS	EFICIENCIAS EN %	
	Construcción simplificada.	Diseño óptimo.
Bomba de agua multipala.	10	30
Bomba de agua de palas de tela.	10	25
Bomba de agua Darrieux.	15	30
Aeromotor Savonius.	10	20
Prototipos de aeromotores pequeños de menos de 2 kw.	20	30
Prototipos de aeromotores medianos de 2 a 10 kw.	20	30
Prototipos grandes de más 10 kw.	---	30 a 40
Generador eólico Darrieux.	15	35

Tabla 3

Clasificación de aerogeneradores para producción de energía eléctrica vs. Potencia eléctrica. (LLanos, 2010)

y como no se usa un multiplicador (caja de engranajes para aumentar el torque y disminuir la velocidad, o viceversa) se puede decir que la eficiencia es de 100 %, no existe una pérdida por ensamble.

Acoplamiento directo de las partes móviles del generador con el eje de las aspas, evita el uso de una caja multiplicadora de revoluciones. Estas cajas multiplicadoras agregan vibraciones, ruido y fatiga al sistema de generación, además de requerir lubricación y mantenimiento (Rosenmann y López, 2007).

Y por último, se halla una eficiencia en la máquina, o sea, el generador. Una pérdida en la forma de construcción y las partes en que forma el generador (la resistencia R y la bobina L) ϵ_3 ; esto no se puede ser tan optimista, las eficiencias están entre el 70 % al 80 % (Hernández, 2010) para los generadores.

Para abarcar lo anterior, se puede decir que la eficiencia total es:

$$\epsilon_T = \epsilon_1 * \epsilon_2 * \epsilon_3 \quad (3)$$

Donde:

- ϵ_T : Eficiencia total.
- ϵ_1 : Eficiencia de la turbina.
- ϵ_2 : Eficiencia del acople eje.
- ϵ_3 : Eficiencia del generador.

De esta manera, se puede calcular la potencia de la turbina con respecto a la potencia de diseño y la eficiencia total.

$$P_t = \frac{P_d}{\epsilon_T} \quad (4)$$

Donde:

- P_t : Potencia de la turbina [W].
- P_d : Eficiencia de la turbina [W].
- ϵ_T : Eficiencia total del aerogenerador.

Con el valor de la potencia de la turbina se calcula el área barrida separando de la fórmula 2:

$$A = \frac{2 * P_t}{V^3 * \rho} \quad (5)$$

Donde:

- P_t : Potencia de la turbina [W]
- A : Área del aerogenerador en contacto con el viento [m²].
- ρ : Densidad del aire [kg/m³].
- V : Velocidad del viento en [m/s].

Existen dos tipos de turbinas dependiendo de la orientación del eje (Siza, s.f.):

Eje horizontal: Son las turbinas más conocidas y se les denomina "HAWTs" horizontal axis wind turbines. Los aerogeneradores de eje horizontal son los que han tenido más aplicación industrial a lo largo de la historia. La mayoría de los aerogeneradores instalados en el mundo para producción de energía en grandes cantidades son de eje horizontal y velocidad fija.

Eje vertical. La característica de esta clase de turbina es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo, son también llamados "VAWTs" vertical axis wind turbines.

Entre este tipo existe:

- Darrieus el cual consiste en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.
- Panemonas tiene cuatro o más semicírculos unidos al eje central, su rendimiento es bajo.
- Savonius consiste en dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente.

Las tecnológicas aplicadas sobre los aerogeneradores de eje horizontal, y las consecuentes mejoras en las prestaciones técnicas y económicas de estas máquinas, dejaron en segundo plano el desarrollo de los aerogeneradores de eje vertical. Sin embargo, a pequeña y mediana escala, para consumos independientes de la red eléctrica *stand – alone* se usa de eje vertical.

Para el modelo de la turbina tipo Savonius el área barrida es el área abarcada por las alabes como se ve en la figura2. Por lo tanto, el diámetro de la turbina sería:

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (6)$$

Donde:

- D : Diámetro de la turbina [m].
- A : Área del aerogenerador en contacto con el viento [m²]

Además, se puede determinar el diámetro de la turbina con la potencia máxima:

$$P_{max} = 0,15 * D^2 * V^3 \quad (7)$$

Donde:

- P_{max} : Potencia máxima obtenida por la turbina [W].
- D : Diámetro de la turbina [m].
- V : Velocidad del viento [m/s]

Y nuevamente despejando el diámetro de la ecuación 7, se obtendría:

$$D = \sqrt{\frac{P_{max}}{0,15 * V^3}} \quad (8)$$

GENERADOR:

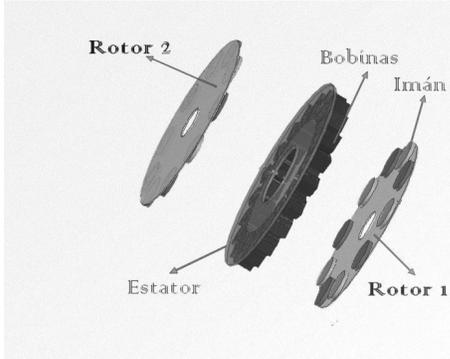


Figura 3. Modelo Generador de Imanes Permanentes.

En la Fig. 3 expone un modelo de generador de imanes permanentes, los cuales están distribuidos sobre dos rotores y un embobinado en el estator. De esta manera, se tiene el campo y el inducido.

El modelo de generador eléctrico es basado en las siguientes ecuaciones (Chapman, 2000):

$$e = K * W_m * \Phi \quad (9)$$

Donde:

- e : Tensión generada [V].
- K : constante de la máquina.
- W_m : Velocidad del rotor [rad/s].
- Φ : Flujo de campo magnético [Wb].

El generador es un alternador de imanes permanentes, ya que, estos son modelos para necesidades de baja potencia con condiciones de operación a bajas rpm (Berdugo y Pérez, 2011).

Existen dos tipos de generadores eléctricos a partir de la dirección del flujo: de flujo radial y de flujo axial, este último es, normalmente, utilizado para aplicaciones de altas potencias (Castillo y Iguarán, 2014).

Por su sencillez de construcción y desarrollo de materias primas el alternador de flujo axial es el más usado en aerogeneradores actualmente (Murillo, 2012).

Los rotores, con los imanes que los componen, actúan como ventiladores, así enfriando los enrollados de estator (Rosenmann y López, 2007).

El flujo de campo magnético es proporcionado por un grupo de imanes permanentes tipo moneda. Si el flujo de campo magnético es:

$$\Phi = B * A \quad (10)$$

Donde:

- Φ : Flujo de campo magnético [Wb].
- B : Densidad de campo magnético [Teslas].
- A : Área transversal del imán [m^2].

Entonces, se puede deducir de la ecuación 10 que entre mayor se el área A de las caras de los imanes, habrá mayor flujo magnético Φ .



Figura 4. Imán tipo moneda

Para especificar el tipo de imán, el cual fue usado en la construcción del prototipo, la tabla 4 resume algunas de la características del imán

La densidad de campo B en un imán se distribuiría de forma uniforme por toda la cara del imán como se expone en la Fig. 5 . La flechas corresponden al sentido del flujo en la cara del imán.

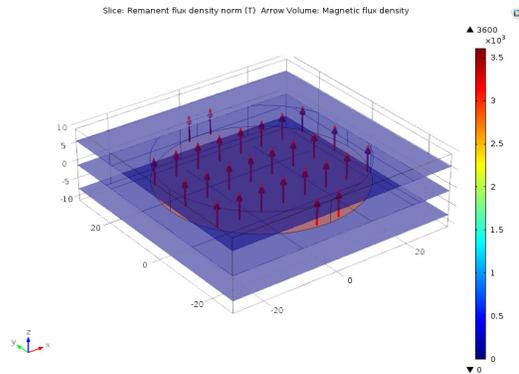


Figura 5. Simulación del flujo magnético del imán.

Tanto los imanes de samario-cobalto como los de neodimio-hierro-boro presentan diversos grados comerciales que les permiten adaptarse a distintas condiciones de utilización (Muñoz, 2008) .

Para la constante de la máquina, el modelo se guía de un generador de flujo axial de polos lisos. De esta manera con un número fijo de imanes, 12 imanes por estator, faltaría calcular el número de bobinas y el número de vueltas por bobina.

En general la constante de la máquina se calcula de la siguiente manera:

$$K = \frac{Z * P}{2 * \pi * a} \quad (11)$$

Imanes	
Material	Neodimio (NdFeB)
Dimensiones	50mm de diámetro x 6mm de grueso
Color	Gris Claro
Densidad de campo magnético	3600 Gauss

Tabla 4
Características del imán.

Donde:

- K : Constante de la máquina.
- Z : Número de vueltas.
- P : Número de polos.
- a : Trayectorias paralelas.

Además,

$$Z = 2 * C * N_c \quad (12)$$

Donde:

- Z : Número total de espiras.
- C : Número de bobinas.
- N_c : Numero de vueltas por bobina.

Entonces, con la información de las ecuaciones 11 y 12, se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Entre mayor número de imanes, se tendrá mayor tensión eléctrica.
2. El número de trayectorias paralelas debe ser el menor posible.
3. El número de bobinas es correspondiente al área del estator.
4. Entre mayor número de vueltas en las bobinas, el número de bobinas es menor.
5. Debe haber el menor salto vacío de aire entre los imanes y las bobinas, un número considerable de bobinas y de imanes (Chumioque, s.f.).

Si se analiza la forma física de las bobinas, al hablar lo largo de éstas, se puede decir que la ley de Lorenz para un conductor que sigue una trayectoria circular (Murillo, 2012) sería:

$$e = \frac{1}{2} * W_m * B * L * (R_1 + R_2). \quad (13)$$

Donde:

- e : Fuerza electromotriz inducida [V]
- W_m : Velocidad angular del rotor [rad/s]
- B : Densidad de campo magnético [T].
- L : Longitud de la bobina [m].
- R_1 : Distancia del centro a la cabeza de la bobina [m].
- R_2 : Distancia del centro a la base de la bobina [m].

Con la Fig. 6, aclara algunas de las variables de la ecuación 13. Sobretudo, las distancias R_1 y R_2 en la bobina.

De la ecuación 13, se puede deducir que entre mayor sea el largo de las bobinas habrá más tensión eléctrica en sus

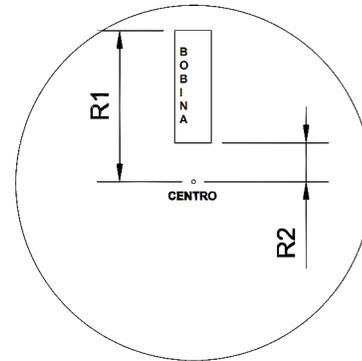


Figura 6. Explicación de la Ley de Lorenz

terminales, siempre y cuando, las bobinas estén dentro del campo magnético.

De las anteriores ecuaciones 9 y 13, existe una variable importante durante los cálculos de tensión eléctrica, la velocidad angular mecánica o velocidad del rotor w_m .

Esta velocidad angular es directamente proporcional con la velocidad del viento, si se dice que a mayor velocidad del viento habrá mayor velocidad angular mecánica.

No obstante, para términos de un generador es mejor hablar de las unidades rpm (revoluciones por minuto, N_m) en vez de referirnos a m/s o km/h.

$$N_m = \frac{TSR * V * 60}{(R * 2 * \pi)}. \quad (14)$$

Donde:

- N_m : Velocidad angular mecánica [rpm].
- TSR : Relación específica o periférica.
- V : Velocidad del viento [m/s].
- R : Radio [m].

TSR, de las siglas en inglés Tip-Speed-Ratio, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto n del rotor; sirve para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas eólicas, por lo que también se le suele denominar velocidad específica (LLanos, 2010).

En la Fig. 7, se observa el rendimiento o la eficiencia de cada modelo de turbina con respecto al TSR. La eficiencia ideal está en un valor de 0,59 p.u.

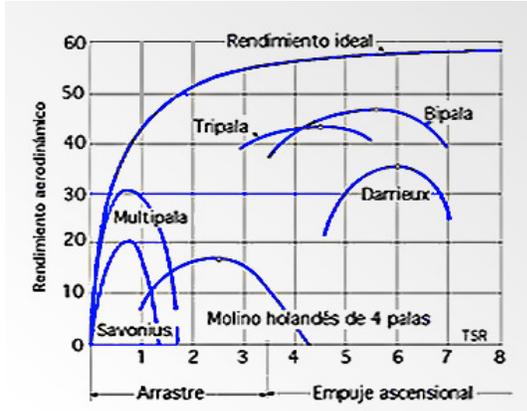


Figura 7. Curva de límite de Betz para diferentes tipos de aerogeneradores (LLanos, 2010).

Para que exista un flujo variable en el tiempo de acuerdo con la Ley de Faraday 15, se distribuye los imanes en el rotor como muestra las Figs. 8 y 9. Las letra describen qué tipo de polo se encuentra de frente (N Norte y S Sur), de esta manera la señal de tensión eléctrica es de forma alterna.

En la tabla 5, aclara las dimensiones y las características del rotor.

$$e = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} \quad (15)$$

Donde:

- Φ : Flujo de campo magnético [Wb].
- e : FEM inducida [V].

Además, de acuerdo a un número de imanes y una velocidad mecánica, la frecuencia eléctrica de la señal de tensión sería (Chapman, 2000) :

$$f_e = \frac{P}{120} * N_m \quad (16)$$

Donde:

- f_e : frecuencia eléctrica [Hz].
- P : Número de Polos.
- N_m : Velocidad mecánica [rpm].

Rotor	
Material	Hierro
Dimensiones	27cm diametro x 0.2 cm grueso
Color	Gris Oscuro
Número de imanes	12

Tabla 5

Características del Rotor:

Para que el flujo magnético vaya de un rotor a otro, en la Fig. 9 expone cómo se colocan las caras de los imanes

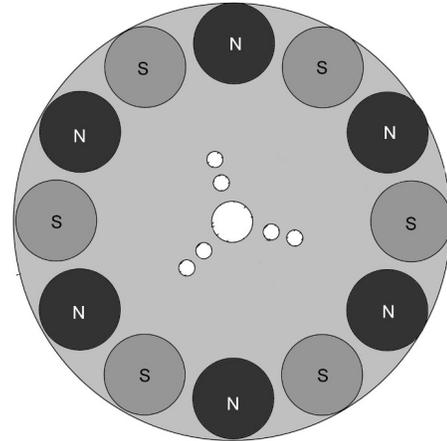


Figura 8. Distribución de los imanes de Neodimio en los rotors.

los cuales son de igual tamaño, con los polos alternados y equidistantes entre sí.

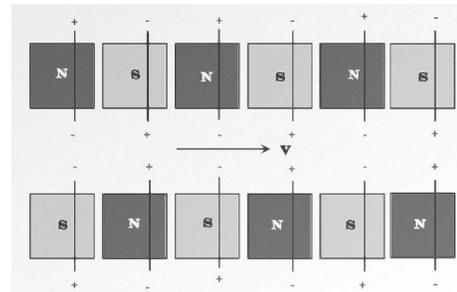


Figura 9. Distribución caras de los imanes de Neodimio (Navasquillo, s.f.).

De esta manera, el flujo magnético corre por el disco que tiene los imanes, así se vuelve un circuito magnético. En la Fig. 10 muestra cómo el flujo magnético está distribuido en el rotor por medio de líneas y las flechas indican la dirección de éste.

El estator está conformado por las bobinas distribuidas alrededor de una placa de acrílico. En la Fig. 11 muestra la forma física de las bobinas en el estator.

Las bobinas deben ser unidas para que una sola corriente circule a través de ellas. De esta manera, la Fig. 12 expone la interconexión de las bobinas y el sentido de la corriente eléctrica para un sentido del giro del eje.

Para especificar el estator, la tabla 6 resume las características del embobinado y el material del estator.

Si se deja el mismo número de bobinas que número de polos, a cada bobina le correspondería un flujo de campo magnético como la suma de los flujos de los dos imanes. En la Fig. 13 expone como los imanes inducen a las bobinas un

Estator	
Material	Acrílico
Dimensiones	32 cm diámetro x 0.5 cm de grueso
Color	Transparente
Peso	1.71 kg
Material de las bobinas	cobre
Dimensiones bobina	20 x 75 x 20 mm
Peso de bobina	0.15 kg
Número de bobinas	12
Número de vueltas por bobina	188
Peso total de bobinas	1.85 kg
Peso total	3.54 kg

Tabla 6
Características del Estator:

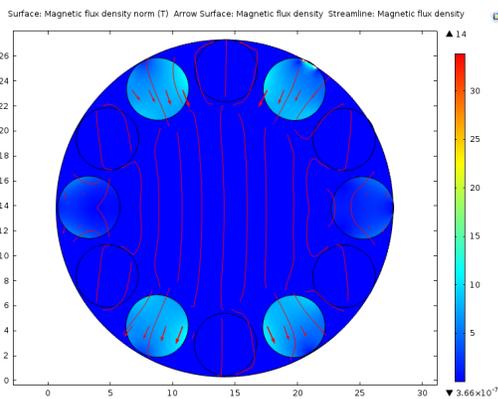


Figura 10. Simulación de la interacción de flujo magnético dentro del rotor.

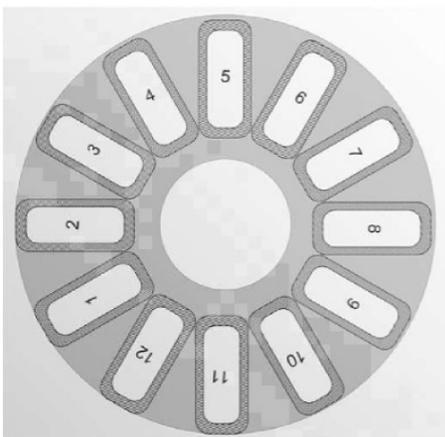


Figura 11. Distribución Bobinas en el Estator.

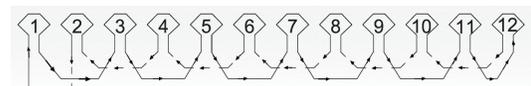


Figura 12. Interconexión de las bobinas.

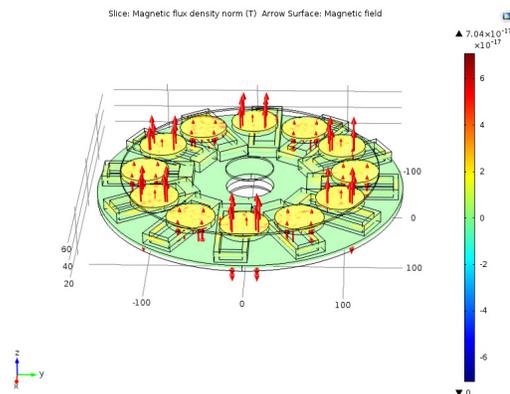


Figura 13. Simulación bobinas dentro del campo magnético.

De esta manera, para cada valor de velocidad de viento se hallará un valor de tensión, rpm, potencia generada y potencia en la turbina.

V [m/s]	P _t [W]	P _g [W]	R.P.M	Tensión[V]	Corriente[mA]
0,5	0,29	0,05	3,14	2,00	23,15
1	2,31	0,37	6,28	4,00	92,59
1,5	7,81	1,25	9,41	6,00	208,33
2	18,52	2,96	12,55	8,00	370,37
2,5	36,17	5,79	15,69	10,00	578,70
3	62,50	10,00	18,83	12,00	833,33
3,5	99,25	15,88	21,97	14,00	1134,26

Tabla 7

Valores de variables eléctricas en el prototipo del aerogenerador.

flujo magnético, el cual cambia al hacer gira el eje. Las líneas indican la dirección del flujo en cada imán en los rotores.

La tabla 7 ayuda a visualizar los valores de potencia y tensión eléctrica para diferentes valores de velocidad de viento. ★ La corriente eléctrica es un valor máximo cuando en las terminales del generador presente la tensión especificada.

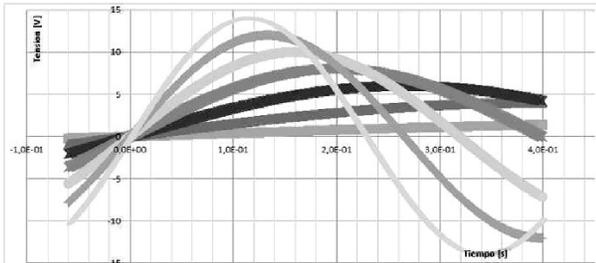


Figura 14. Señales de tensión esperadas a diferentes velocidades del viento.

En Fig. 14 se muestra la diferencia de las señales de tensión en cada una de las velocidades del viento. Se puede apreciar un cambio de la frecuencia eléctrica [Hz] y el valor de la tensión eléctrica [V] a cada una de las velocidades del viento [m/s].

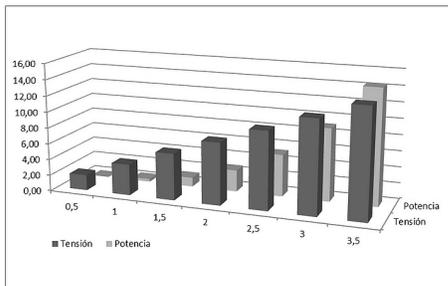


Figura 15. Potencia generada y tensión eléctrica Vs. Velocidad del viento.

Para poder analizar los valores potencia y tensión a diferentes valores de velocidad del viento, la Fig. 15 ofrece valores tensión y potencia generada por la maquina sincrónica.

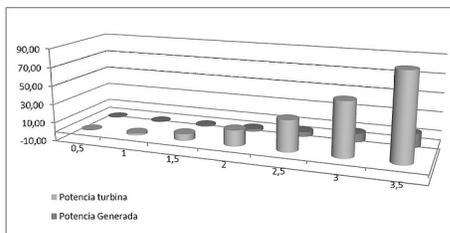


Figura 16. Potencia en la turbina y Potencia generada vs. Velocidad del viento.

Las potencias del sistema, tanto la potencia de la turbina P_t como la potencia generada P_g , son diferentes a cada valor de velocidad del viento como se puede apreciar en la Fig. 16.

En la Fig. 17 se exponen las características eléctricas del estator como un circuito eléctrico. Se muestran dos elementos los cuales R y L son la resistencia eléctrica del conductor y L la inductancia formada por el arrollamiento del conductor (Bobina) respectivamente.

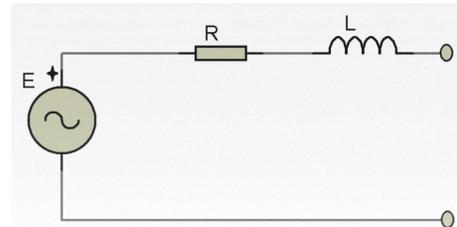


Figura 17. Circuito equivalente en el Estator.

Para hallar el valor de R manera teórica, al tener en cuenta la longitud del conductor y una resistividad aparente propia de cada tipo de alambre, se usaría las siguientes ecuaciones:

$$r = \rho_a * l \quad (17)$$

Donde:

- r : Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].
- ρ_a : Resistividad Aparente del conductor [Ω/m].
- l : Longitud del alambre [m].

$$L = \frac{N^2 * \mu_0 * A}{l} \quad (18)$$

Donde:

- L : Inductancia de los devanados [H].
- N : Número de vueltas.
- μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío. $4 \times 10^{-7} \frac{H}{m}$
- A : Área por la que atraviesa el flujo [m^2].
- l : Longitud que recorre el flujo [m].

RECTIFICADOR:

La rectificación de tensiones y corrientes CA se realiza por medio de diodos (Mohan, 2009). El voltaje de CC de salida de un rectificador debe estar tan libre de ondulaciones o rizados como sea posible. Por tanto, se conecta un condensador grande como filtro del lado DC.

En la Fig. 19 se expone dos señales de tensión eléctrica, la señal de forma sinusoidal sería la señal de entrada del rectificador a una frecuencia 60 Hz a 12V de amplitud. La señal continua representa la salida del rectificador, se posible apreciar la disminución de la tensión eléctrica al paso de una señal a otra, la tensión es aproximadamente de 11.1V.

En la tabla 8 resume algunas características del prototipo de rectificador utilizado para el proyecto.



Figura 18. Prototipo del rectificador de onda completa.

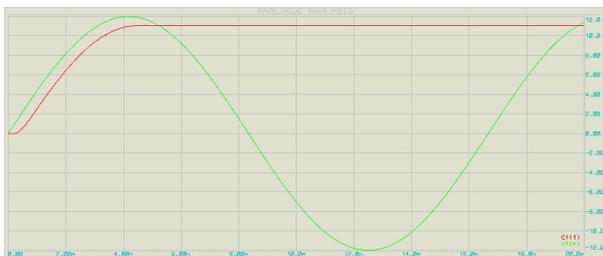


Figura 19. Señal esperada por el rectificador de onda completa.

Rectificador	
Tensión entrada AC Max.	24V
Tensión de Salida DC	24V
Corriente Max.	1A

Tabla 8

Características del Rectificador.

CONVERTIDOR DC/AC:

Ya que se genera a una potencia diferente a la potencia de salida del sistema. Se acopla un dispositivo, convertidor DC/AC, después del regulador de carga donde se encuentra el banco de baterías para ofrecer la energía acumulada a 120V a 60Hz.

El convertidor de energía es un sistema electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferente. Esto incluye aspectos como eficiencia, reversibilidad, grado de idealidad y fiabilidad.

Los convertidores DC/AC reciben también el nombre de inversores, realizan la conversión de corriente continua a corriente alterna, con la posibilidad de poder controlar tanto la frecuencia como el valor eficaz de la tensión o intensidad de salida, y su forma de onda (Mañana, 2002) .

Convertidor DC/AC	
Potencia	100W
Tensión de entrada DC	12V
Tensión de salida AC	120V
Tensión de salida USB	5V
Corriente de salida	1A

Tabla 9

Características del Convertidor DC/AC.

REGULADOR DE CARGA:

Este dispositivo electrónico evita sobrecargas o descargas excesivas a la batería, puesto que los daños podrían ser irreversibles. Además debe asegurar que el sistema siempre trabaje en el punto de máxima potencia, o lo más cerca posible (Forget, s.f.) .

La función principal de este componente es controlar el estado de carga de la batería, asegurando así la vida útil de la misma:

- Controla el nivel de carga y descarga de la batería.
- Evita la sobrecarga de la batería, impidiendo la entrega de corriente desde la alimentación cuando ya está cargada. Esto también asegura que el voltaje de la batería no esté mayor a lo permitido en los equipos conectados.
- Evita la descarga profunda de la batería, cortando la entrega de corriente a las cargas de consumo cuando la batería ya alcanzó el límite bajo de voltaje.

Regulador de Carga	
Tension nominal	12V
Modo de carga	PWM
Tensión de apertura desde entrada	17.4V
Tensión de desconexión de batería	10.7V
Tensión de salida USB	5V
Tensión de reconexión de la batería	12.6V

Tabla 10

Características del Regulador de Carga.

Vale aclarar que los valores de la tabla 10 pueden ser modificados, de acuerdo con las características de la batería 11. Para este modelo se usa VS4024U.

BATERIAS:

Básicamente, la energía de una batería se genera a partir una reacción química (Lagos, s.f.) donde se hace una doble conversión de energía. La primera conversión, energía eléctrica en energía química, toma lugar durante el proceso de carga. La segunda, energía química en eléctrica, ocurre cuando la batería es descargada. Para que estas conversiones puedan llevarse a cabo se necesitan dos electrodos metálicos

inmersos en un medio que los vincule, llamado electrolito (Rodríguez, s.f.) .

Batería	
Tension nominal	12V
Capacidad nominal (Tasa de 20 horas)	7Ah
Resistencia interna (Carga completa)	19mΩ
Máxima descarga de corriente	105A por 5s
Máxima corriente de carga	1.4V

Tabla 11
Características de la Batería.

Una de las manera de representar un modo de cargar una batería, al considerar el manual de la batería HGL7-12, es el algoritmo de tres etapas, en la Fig. 20 representa las tres etapas en que la batería comienza a cargar hasta que ésta totalmente cargada.

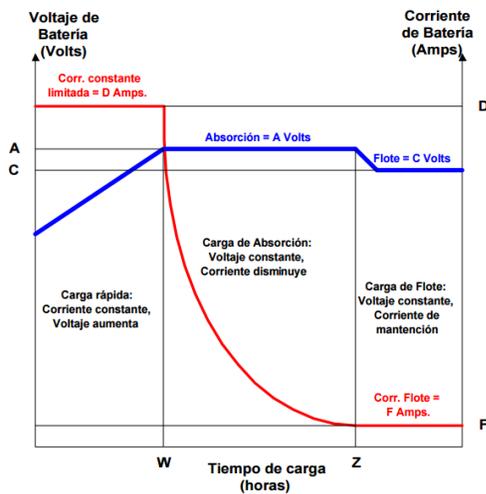


Figura 20. Algoritmo de tres etapas (Lagos, s.f.) .

En el caso de la tensión, el valor de la tensión A es una constante para el cargador durante la etapa de absorción y C es valor de tensión constante durante la etapa de almacenamiento.

Para la corriente, D es el limite de corriente eléctrica regulada o la corriente que el cargador mantiene constante duran la etapa de carga principal. El valor de F es una corriente en la etapa de almacenamiento.

Finalmente, para el valor de tiempo W es el tiempo de carga principal. Z es el tiempo total transcurrido en la etapa de carga principal y la etapa de absorción. Se puede inferir que la duración de la etapa sería numéricamente igual a la diferencia entre Z y W. El tiempo de la etapa de almacenamiento sería indefinida.

Evaluación de desempeño

Para obtener un valor aproximado de las pérdidas eléctricas, se hace una prueba de laboratorio. Esta prueba consiste en hallar la resistencia eléctrica de los devanados, por medio de una excitación externa con una fuente eléctrica DC. Para encontrar la pérdidas por calor en esta clase de generadores eléctricos, la ecuación es la siguiente:

$$P_e = I^2 * r \quad (19)$$

Donde:

- P_e : Pérdidas eléctricas [W]
- I : Corriente eléctrica que circula por los devanados [A]
- r : Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].

En la Fig. 21 expone el esquema de conexión de los multímetros con una fuente externa de corriente DC, el instrumento que tiene la palabra volt es el voltímetro y amp es el amperímetro. Para este caso se usaron los Multímetro True RMs Fluke 179 y Fuente Exttech 382-210.

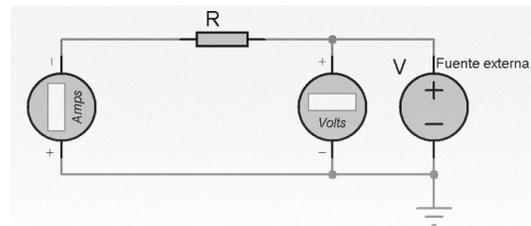


Figura 21. Esquema de medición de la resistencia en DC.

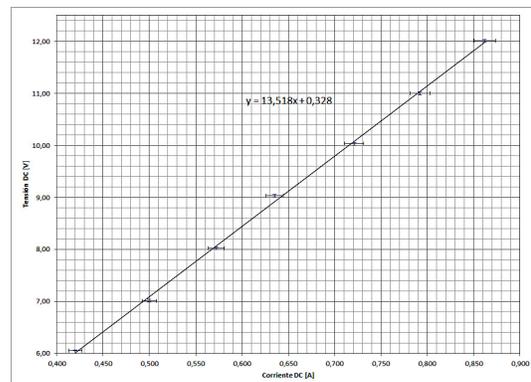


Figura 22. Valores de la medición de la resistencia en DC.

En la Fig. 22, se observa una gráfica conformada por una serie de puntos en la cual la tensión y corriente eléctrica se enfrentan, con la ayuda de la Ley de Ohm, se puede obtener la resistencia de los devanados, de la misma manera, al dibujar una línea de tendencia se puede hallar un valor aproximado de la resistencia.

Vale aclarar que la parte inductiva "L" no se analiza dentro del circuito, porque a la frecuencia de 0 Hz, su valor es nulo. (Ver la ecuación 22

$$V = I * r \quad (20)$$

Donde:

- V: Tensión de suministro [V]
- I: Corriente eléctrica medida [A]
- r: Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].

Entonces, la pendiente de la gráfica tensión vs. corriente eléctrica, se obtendría la resistencia eléctrica de los devanados.

Adicionalmente a esta prueba, se hace una prueba en corriente alterna para hallar la parte reactiva, es decir, L. Sin embargo, se debe hallar un valor previo, el cual es la Impedancia.

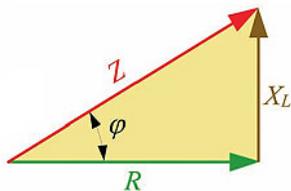


Figura 23. Triángulo de impedancias (Miguel, 2014) .

$$Z^2 = r^2 + x_l^2 \quad (21)$$

Donde:

- Z: Impedancia [Ω].
- r: Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].
- x_l : Reactancia los devanados [Ω].

De la misma manera que la resistencia fue medida, la impedancia se mide con una fuente externa de corriente alterna a un frecuencia eléctrica de 60 Hz, se usó los mismo instrumentos de medida que la anterior medición 21 .

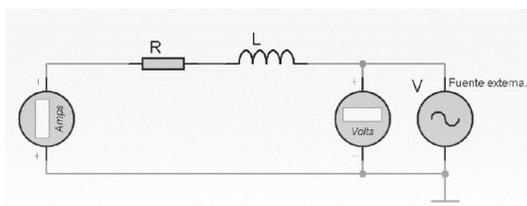


Figura 24. Esquema de medición de la impedancia.

Al hacer un símil con la resistencia en la ley de ohm, la impedancia se halla su magnitud con la relación de la magnitud de la Tensión sobre la magnitud de corriente eléctrica.

Despejando de la ecuación 21 en valor de x_l , se tendría el valor de la reactancia para un valor de frecuencia

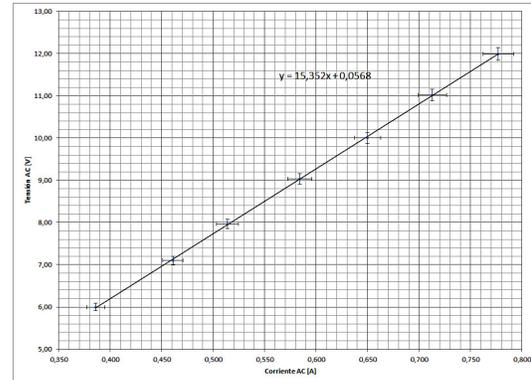


Figura 25. Valores de la medición Impedancia.

determinada, si se desea saber el valor de L, se emplea la ecuación 22 :

$$x_l = 2 * \pi * f * L \quad (22)$$

Donde:

- x_l : Reactancia los devanados [Ω].
- f: Frecuencia en el momento de la medición [Hz].
- L: Inductancia de los devanados [H].

Para observar el comportamiento del rectificador al pasar una señal a 60 Hz, se hace una medición de tensión eléctrica tanto a la salida como la entrada del este dispositivo con un osciloscopio, el cual debería tener dos canales, este caso de uso el osciloscopio digital Rigol DS1102E.

En la Fig. 26 se expone dos señales: primera señal de forma sinusoidal, con 5V de división y como referencia la flecha con número 1, es la entrada al rectificador con una fuente variable AC. La segunda señal de forma constante en el tiempo, 5V de división y referenciada con la flecha con el número 2, es la salida del rectificador sin carga. La escala de tiempo está en milisegundos en divisiones de 5ms.

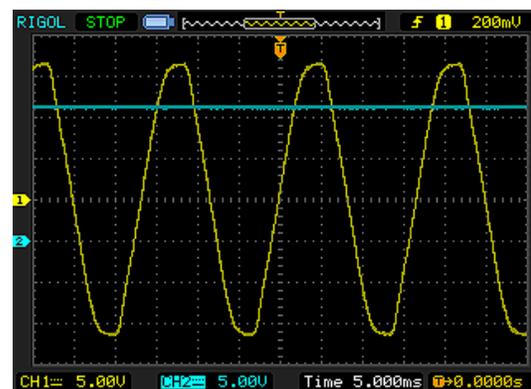


Figura 26. Señal de entrada y salida del Rectificador.

Una de las prueba eléctrica era reconocer el comportamiento del regulador de carga con una batería cargada y a su salida el convertidor DC/AC. En Fig. 27 muestra una señal de tensión eléctrica para la salida del sistema, dicho anteriormente, la sonda fue atenuada x10 para la visualización de las dos señales en un solo oscilograma. La prueba se hace sin carga.

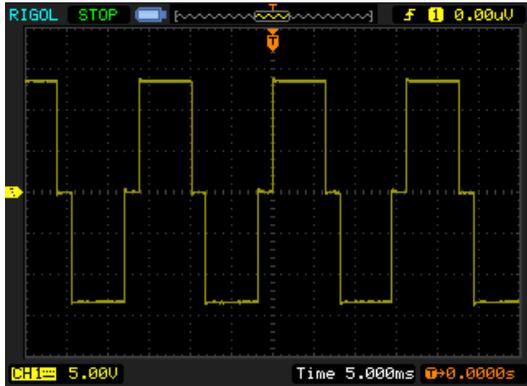


Figura 27. Señal de salida del Inversor y Regulador de carga.

Para contemplar algunos de los valores de la salida del sistema como la tensión máxima, mínima, rms, periodo, frecuencia eléctrica, entre otras. En la Fig. 12 resume la información de la medición.

Umax= 13.8V	Uavg=-368mV	Rise=2.200ms
Umin=-13.8V	Urms= 12.1V	Fall=2.060ms
Upp= 27.6V	Uovr=1.3%	+Wid=1.000ms
Utop= 13.5V	Upre=0.5%	-Wid=8.100ms
Ubas=-13.5V	Prd=18.00ms	+Duty=55.6%
Uamp= 27.0V	Freq=55.56Hz	-Duty=450.0%

Tabla 12

Valores de tensión para la salida del inversor.

En las Figs. 29, 28 y 30, se expone la señal del generador eléctrico a tres diferentes frecuencias [Hz] concorde a tres niveles de tensión [V]. De esta manera, la señal que se visualiza tiene forma sinusoidal en los tres casos.

En la siguiente gráfica 31 expone una medición del generador eléctrico al medir la magnitud de la tensión eléctrica a través de diferentes revoluciones por minuto visto del eje. Existe una variación proporcional de la tensión eléctrica con velocidad mecánica del eje, ya que el eje está conectado a un turbina tipo Savonius.

A medida que gire a mayor velocidad [rpm] el eje, la tensión aumenta. Vale aclarar que existe un punto de operación, donde los valores de tensión eléctrica más elevados (10 a 18 V) se encuentran en un rango de 110 a 210 rpm.

De la misma manera que cambia la tensión eléctrica, la frecuencia eléctrica varía de acuerdo con la velocidad del

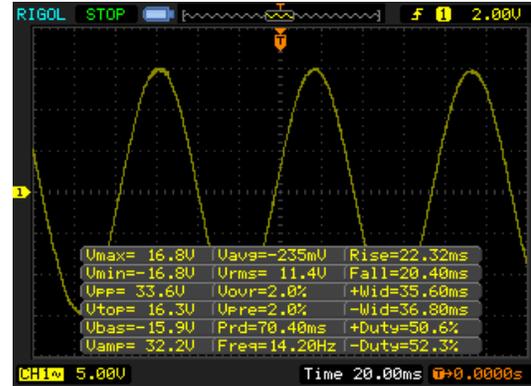


Figura 28. Señal del generador en vacío a 16.8 V pico.

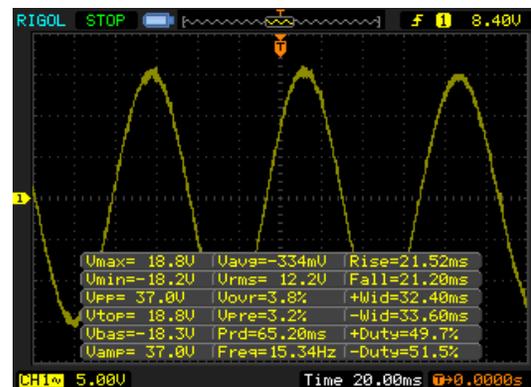


Figura 29. Señal del generador en vacío a 18.8 V pico.

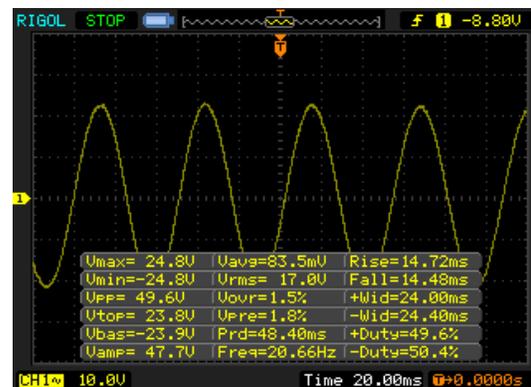


Figura 30. Señal del generador en vacío a 24.8 V pico.

viento como se muestra en la Fig. 32, concorde con la ecuación 16. La velocidad del viento [m/s] en el eje de las abscisas no presenta un valor constante en ninguno de sus intervalos, de esta manera, la frecuencia [Hz] en el eje de las ordenadas puede tener valores altos y bajos para los mismos valores de la velocidad del viento.

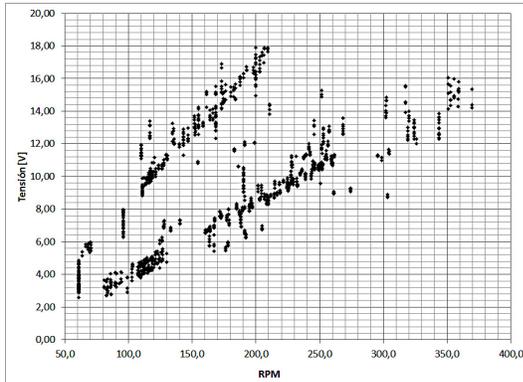


Figura 31. Gráfica de Tensión Vs. RPM

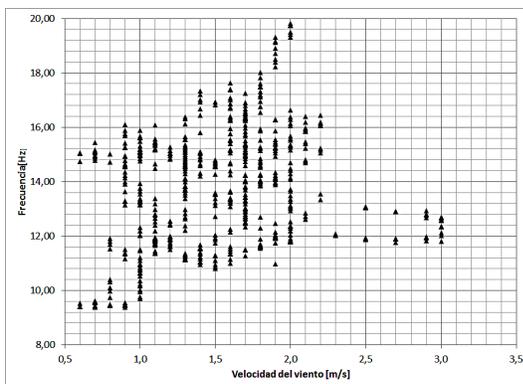


Figura 32. Gráfica de Velocidad del viento Vs. Frecuencia Eléctrica.

Conclusiones

• En esta investigación se enfatiza en un prototipo de generación eléctrica, el cual aprovecha la potencia mecánica que ofrece la viento para transformarla a potencia eléctrica. El prototipo opera a la condiciones dimensionadas, previas a la construcción, además, es posible alcanzar valores de tensión eléctrica superiores cuando la velocidad del viento incremente considerablemente. La construcción se realizo basado en modelos de alternadores de imanes permanentes, es decir, cuanto mayor sea el flujo magnético proporcionado por los imanes, el generador eléctrico podrá entregar en sus terminales mayor tensión eléctrica a menores velocidades. Durante las pruebas de desempeño se observó que los valores de velocidad mecánica [rpm], frecuencia[Hz] y tensión eléctrica [V], no eran concretos para un sólo valor de velocidad del viento [m/s], sin embargo, el prototipo cumplía con el objetivo de proporcionar energía eléctrica al banco de baterías, a través de los dispositivos electrónicos dimensionados para la transformación y regulación de la energía eléctrica.

• La energía eólica es un recurso útil visto desde cualquier valor de potencia, siempre y cuando sea dimensionado adecuadamente. Puede que sea difícil generar grandes cantidades de energía eléctrica con bajas velocidades de viento, sin embargo, pequeños prototipos de generación, distribución y regulación puede llegar a ser un grano de arena para contribuir con el cuidado del medio ambiente.

• Existen varios modelos de turbinas eólica entre las cuales cambian sus parámetros de diseño, esto de acuerdo con las características propias del lugar, es decir, la velocidad del viento o propiamente hablando del TSR y los lugares de disponibilidad en donde se puedan ubicar las turbinas eólicas. La facilidad de construir una turbina eólica comprende desde la forma física hasta costo monetario que se conlleva, de este orden de ideas, una turbina eólica puede disminuir su tamaño físico, si se apoya la potencia eléctrica con dispositivos electrónicos de potencia. El costo monetario puede elevarse por los elementos electrónicos adiciones a la generación, sin embargo ofrecen una disponibilidad de la energía eléctrica a mayor rango de tiempo.

• Algunos de los requisitos de la construcción de un generador de imanes permanentes, es propiamente la magnetización o flujo magnético de los imanes, el tamaño de estos, las dimensiones de los devanados y estructura física propia de la máquina (Carcasa). Todo esto lleva a cálculos, los cuales el constructor del prototipo debe investigar en gran número de documentos y unificar fórmulas que muestren una guía para el modelo a construir, con lo anterior, este documento pretende dar algunas indicaciones generales para un tipo de generador y así contribuir con futuros trabajos.

• Las pruebas realizadas en este documento fueron enfocadas en visualizar u obtener un valor en que todo funcionara de acuerdo a cálculos previamente hechos o estimaciones propias por los autores para el funcionamiento del prototipo, encontrar las especificaciones mínimas de la máquina y que la potencia fuera suficiente para su uso final. Para cada prueba fue necesario usar equipos de medición en lo cual es necesario enfatizar que la utilización de estos equipos implica una responsabilidad, para esto, el personal debe ser capacitado, tener idea de lo que desea hacer y desea visualizar.

Trabajo futuro

- Investigación precisa de los elementos electrónicos para el funcionamiento optimo del sistema.
- Formulación de modelos eléctricos y electrónicos diferentes al descrito en este articulo, para la comparación de eficiencia del sistema.
- Una investigación apropiada, más allá de beneficio costo en la parte monetaria, si no en el ámbito de impacto medio ambiental, es decir si estos modelos son realmente mitigadores del daño ambiental a futuro.

- Investigación de otras finalidades de la micro-generación, en lugares urbanos como la ciudad de Bogotá.

Reconocimientos

Jhon Edison Franco Gamba, por su participación del documento previo a éste, para generar una propuesta con un objetivo real. Profesor Fredy H. Martínez Sarmiento, por su colaboración en realización de este documento, al dar observaciones acertadas y constructivas en el proceso de desarrollo. También por proporcionar parte de los dispositivos en el prototipo. Al Grupo de Investigación de Energías Renovables de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por su colaboración en el acceso a su turbina eólica para la investigación del generador eléctrico y comparar valores de teóricos del dimensionamiento de la turbina tipo Savonius. A las empresas que afectaron de manera directa e indirecta en la construcción de este prototipo, por su cumplimiento y responsabilidad. A mis jefes que los cuales me dieron una oportunidad de trabajo para financiar este proyecto, y también comprender mi retiro para la culminación de éste. A mi familia por la paciencia acumulada por varios años y respetar mis decisiones, las cuales tome para terminar mi carrera. A todos mis profesores que se tomaron el tiempo en formar personas, no sólo en la parte académica sino con una educación reflexiva en el cuidado de su entorno. Y sobre todo a Dios, que me dio fuerza para terminar este proyecto, guiándome en buen camino, aconsejándome cuando no tenía más ideas. Este trabajo es dedicado a Él.

Referencias

- Aguilar, L., Arias, C., Guasca, A., y Lamus, M. (2010). Evaluación del potencial energético del viento entre dos edificios de pequeña altura. En *6to taller internacional de energía y medio ambiente*.
- Berdugo, O., y Pérez, J. (2011). *Diseño y construcción de un prototipo turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia*. (Universidad Industrial de Santander)
- Castillo, C., y Iguarán, H. (2014). *Diseño y construcción de un generador de magnetos permanentes*. (Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingeniería Mecánica Bucaramanga)
- Chapman, S. (2000). *Máquinas eléctricas*. Mc Graw Hill.
- Chumioque, R. (s.f.). *Cómo construir un aerogenerador de 700 vatios*. Descargado de <http://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-700w.pdf>
- Forget, A. (s.f.). *Manual de diseños de sistemas fotovoltaicos aislados*. (2011)
- Hernández, F. (2010). *Diseño y construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia*. (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Ingeniería Eléctrica.)
- Lagos, P. (s.f.). *Conceptos básicos de carga de batería y algoritmo de carga*. (Sidei Ingeniers Ltda.)
- LLanos, J. (2010). *Energía eólica, iv parámetro de diseño*. (2010)
- Mañana, M. (2002). Regulación, control y protección de las máquinas eléctricas. *Universidad de Cantabria, 1*, 9-10.
- Miguel, P. A. S. (2014). *Electrotecnia*. Ediciones Paraninfo.
- Mohan, T. . R. W., N. & Undeland. (2009). *Electrónica de potencia convertidores, aplicaciones y diseño* (P. E. R. Vázquez, Ed.). Mc Graw Hill.
- Muñoz, R. L. (2008, Octubre). *Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización*. (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)
- Murillo, J. (2012). *Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes*. (ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL)
- Navasquillo, J. (s.f.). *Funcionamiento de un generador de imanes permanentes usando la expresión de lorenz*. Descargado de <http://www.uv.es/~nnavasqui/aero/Fungenper.pdf>
- Neumann, A. L. (2002). *La energía eólica: Principios básicos y tecnología*. Departamento de ingeniería, Universidad Carlos III de Madrid.
- PENN. (s.f.). *Computer power usage. penn information systems & computing*. Descargado de <https://secure.www.upenn.edu/computing/resources/category/hardware/article/computer-power-usage> (2013)
- Rocabado, S., Díaz, J., y Cadena, C. (s.f.). *Cargadores solares portátiles para el uso de dispositivos móviles en zonas rurales aisladas del noa*. Descargado de https://www.researchgate.net/publication/281849846_CARGADORES_SOLARES_PORTATILES_PARA_EL_USO_DE_DISPOSITIVOS_MOVILES_EN_ZONAS_RURALES_AISLADAS_DEL_NOA (2015)
- Rodríguez, G. (s.f.). *La batería de plomo-ácido*. Descargado de http://www.academia.edu/8510517/CAPITULO_5_LA_BATERIA_DE_PLOMO-ACIDO (Capítulo 5)
- Rosenmann, P., y López, J. (2007). Diseño de aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, Memoria (Ingeniería Civil Electricista), 1*, 1-129.
- Siza, G. (s.f.). *Diseño, simulación y construcción de un prototipo de aerogenerador de eje horizontal*. (2009)

