

PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO TURBULENTO ORIENTADO A SUMINISTRO ENERGÉTICO PARA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE BAJA ESCALA

PROTOTYPE OF A TURBULENT FLOW WIND TURBINE ORIENTATED TOWARDS THE ENERGY SUPPLY FOR AGRICULTURAL PRODUCTION OF LOW SCALE

Germánico Sinchiguano Molina¹, Vicente Córdova²

¹ *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Unidad de Gestión de Tecnologías, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n. – Latacunga – Ecuador.*

² *Universidad Técnica de Cotopaxi*

e – mail : ¹gsinchiguano@espe.edu.ec, ²vicente.cordova@utc.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 8 (15)

RESUMEN

La investigación se encuentra direccionada al desarrollo del diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento con la finalidad de proveer el punto de partida hacia una fuente de suministro energético para producción agrícola familiar, basándose en el análisis de captación de origen eólico dentro de esquemas de giro por eje vertical y denominación de perfiles aerodinámicos NACA. Para la comprensión inicial teórico – técnica del fenómeno se realizó una investigación de tipo bibliográfica, donde se recabó una cantidad determinada de información teórica, que serían posteriormente completados con la esquematización de un marco metodológico de medición de indicadores mediante instrumentación especial, la misma que permitirá pre visualizar el fenómeno dentro de las inmediaciones del emplazamiento correspondiente al Campus CEYPSA sector SALACHE. Apartir de la información recolectada, se realiza el análisis de selección de perfiles aerodinámicos de acuerdo a sus características de comportamiento, finalizando el proyecto con la construcción de un prototipo a partir del marco propositivo, adicionando un estudio concluyente de factibilidad económica, compatibilidad con el medio

circundante y análisis por simulación del viento como un fluido dentro de un software especializado.

Palabras clave

Captación eólica, Flujo Turbulento, Suministro energético, Perfil aerodinámico NACA.

ABSTRACT

This investigation was mainly directed to the development of the design and prototyping of a wind turbine for turbulent flow, in this case especially to develop the starting point to provide an energetic supply for familiar agricultural production, based in the air flow catchment analysis inside vertical axis schemes and selection of NACA aerodynamic profiles. For an initial technical and theoretical comprehension of the phenomenon a bibliographic investigation was made where determined theoretical information was recollected. This information was later completed with a measurement methodological frame of airflow indicators through special equipment, which would provide to see a previous phenomenon within the site where is located in CEYPSA place in Salache town. Since the gotten information along

the methodological frame, a selection of aerodynamic profiles according to behavior characteristics was made. This project finishes with the construction of a vertical axis wind turbine prototype. At the end, the investigator presents an economic feasibility study surrounding compatibility and the software simulation results of the air as a fluid object.

Keywords

Airflow Catchment, Turbulent Flow, Energetic Supply, NACA Aerodynamic Profiles.

1. INTRODUCCIÓN

Más allá de las dificultades que se presentan en el medio productivo agrícola, se han venido desarrollando una serie de oportunidades de inclusión de medios de generación energética a partir de la utilización de fuentes renovables no convencionales, como representan la energía solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, geotérmica de baja y mediana entalpía, la biomasa entre otros, aprovechando así cada vez más la producción energética proveniente de la misma naturaleza, siendo su mayor potencial su carácter inagotable.

Tal como lo señala la (F.A.O., 2014), para seguir el paso de la creciente demanda interna de alimentos, cumplir los requisitos necesarios para mejorar la competitividad y, en definitiva, aumentar los ingresos rurales, hace falta aumentar la productividad agrícola. Sin embargo, tal como hace hincapié la (F.A.O., 2014), en la mayoría de los casos el crecimiento agrícola sostenido requiere considerables inversiones en riego e infraestructura rural, y en desarrollo humano e instituciones.

Desde la perspectiva inicial de la problemática observada, se evidencia que existe un crecimiento acelerado del uso de la generación distribuida,

sin embargo, la falta de recursos en los sectores aledaños de las ciudades y la falta de gestión de las autoridades, ha hecho que la energía eléctrica no llegue a estos sectores. Por tal razón, las personas de estas zonas recurran a energías alternativas, en especial por la necesidad de la introducción de fuentes renovables de energía.

El diagnóstico inicial sectorial presenta debilidades permanentes ya que consumo energético general de la zona centro del Ecuador ha dependido principalmente de la introducción en masa de tecnología por parte del Gobierno [1]. De forma paralela, el crecimiento económico de una región requiere una gran demanda de energía, ya que es necesario construir infraestructuras de todo tipo, lo que exige la industria pesada, la cual requiere, a su vez, grandes cantidades de materia prima y, claro está, de energía.

La energía eólica, transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala desde mediados de la década del 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles. Son pocos los países en vías de desarrollo que han creado políticas para la implementación de la energía eólica [1] [2], a pesar de sufrir graves problemas de demanda de electricidad, especialmente en el sector rural.

Desde una perspectiva local, en el Ecuador la implementación de sistemas de eficiencia energética en el campo laboral y productivo de la agricultura se encuentra en un proceso de madurez reciente, razón por la cual la introducción de un proyecto de eficiencia energética como el presentado en el proyecto científico pretende establecer una

herramienta de aporte potencial e innovación, apoyado en el diseño y prototipado inicial de un aerogenerador de flujo turbulento, mediante la captación efectiva y sustentable de las cualidades expresas por el viento y su naturaleza, en el Campus CEYPSA sector SALACHE de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi, con la finalidad de lograr una independencia energética para los moradores de la zona inicialmente, pudiendo ser aplicada posteriormente en otros sectores del país.

Es necesario mencionar que en el sector existen terrenos áridos, lo que hace que las familias del sector dependan mucho de la lluvia [20]. Es evidente la falta de energía eléctrica y la falta de tecnología apropiada para aprovechar el beneficio de la energía que en este caso proporciona el viento para que las familias afectadas puedan tener una autonomía energética.

2. DESARROLLO

En el marco contextual y teórico, para su correcta estructuración es indispensable señalar una serie de trabajos investigativos realizados previamente, los mismos que conforman el punto de inicio hacia el establecimiento efectivo del tema a analizar [3]. Tal como lo indican la producción de alimentos agrícolas presentan diferentes barreras desde la necesidad de suelos fértiles, cantidad de agua, laboreo, condiciones climáticas adecuadas, rudeza de las condiciones laborales, secado de los productos para su conservación hasta la posibilidad de la fuerza de trabajo disponible.

Se parte de propuestas de tecnologías conocidas internacionalmente [4] [5], como torre solar eólica, el secado solar y el cultivo en invernadero, las dos primeras no tan bien conocidas como el cultivo intensivo y controlado

usado tanto en países cálidos como en templados, dichas tecnologías unidas a la existencia de chimeneas abandonadas de los centrales azucareros cubanos y fuerza de trabajo disponible alrededor de la antigua industria, permiten la posibilidad de una segura y estable producción agrícola, incluido el secado de sus productos.

La aplicación de sistemas de energía renovable no convencional, se indica como antecedente principal [8] denominada "Instalación Eólico-fotovoltaica para suministro eléctrico a un sistema de riego por goteo para uso agrícola" cuya finalidad fue la de poder aplicar medios de energía renovables no convencional, en este caso eólico – solar fotovoltaico, para la implementación en un sistema de riego por goteo, el mismo que es de uso extendido dentro del campo de la producción agrícola.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo conceptual de diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar se basa en la configuración inicial propuesta por los aerogeneradores de eje vertical de tipo Sanovius, especialmente el esquema desarrollado para aerogeneradores Windspire, cuyas características principales de composición son:

- El aerogenerador Windspire opera en zonas con velocidades promedio del viento de por lo menos 4,5 m/s (10 mph), siendo de máxima predilección emplazamientos que excedan los 5,4 m/s (12 mph).
- A velocidades de viento superiores a 3,5 m/s, el Windspire comenzará a producir energía, que se mide en vatios (W) o kilovatios (kW), con la

principal característica de que una Windspire de 1,2 kW producirá 2000 kWh en vientos promedios de 5 m/s.

- Los aerogeneradores windspire operan con tres juegos de altas y estrechas superficies de sustentación que capturan el viento mientras que hace girar el sistema alrededor de un eje vertical.
- Los sistemas Windspire pueden funcionar en un rango de velocidades entre 3 – 11 m/s. A velocidades superiores a los 11 m/s el sistema de frenado electrónico participará como medida de seguridad, para protección ante la presencia de rafagosidad variable, turbulencia destructiva y vientos huracanados.

De la información recogida se evalúan estostrestiposdealternativasdesolución a la problemática establecida [17] [18], como se señala de forma individual y comparativa final dentro de la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de alternativas de diseño.

NACA 0015
<ul style="list-style-type: none"> • Perfil simétrico. • Máximo espesor de 15 % de la cuerda. • Posición de la máxima deflexión de la línea de curvatura como un porcentaje de $c = 0\%$. • Máxima deflexión de la línea de curvatura $X_{cmax} = 10\%$. • Espesor de perfil t como un porcentaje de $c = 15\%$. • Coeficiente de presión en el borde de ataque son los mismos en el extradós como el intradós.
NACA 0018

- Perfil simétrico (00).
- Máximo espesor del 18% de la cuerda.
- Posición máxima de deflexión $c = 0\%$.
- Máxima deflexión de la línea de curvatura $X_{cmax} = 10\%$.
- Espesor del perfil t como un porcentaje de $c = 18\%$.
- Bajo coeficiente de sustentación máximo.
- Momento de cabeceo alto.

NACA 0021

- Perfil simétrico de 21% de grosor.
- Punto de máximo espesor ubicado en $x/c=0,30$ donde x es la coordenada axial medida del frente del asa y c es la longitud de la cuerda.
- Posición máxima de deflexión $c=0\%$.
- Máxima deflexión de línea de curvatura $X_{cmax}=10\%$.
- Espesor de perfil t como un porcentaje de $c=21\%$.
- Buena característica de parada.
- Pequeño centro de movimiento de presión.
- Rugosidad con poco efecto.

Para la especificación de las alternativas de solución, a continuación en la Tabla 3 se especifica la tabla de comparación ponderada por pares de requerimiento de ingeniería y diseño de medios de captación eólicos por eje vertical y tipología Savonius [14] [15], además en la tabla 4 hace mención a la selección de alternativas del proyecto planteadas y finalmente en la tabla 5 se provee los medios de selección por alternativas de proyecto planteadas por criterios de prioridad y sumatoria de eventos.

Tabla 2. Tabla ponderada por pares de requerimiento de ingeniería.

Deformaciones y vibraciones	Resistencia a la fatiga	Resistencia a la torsión	Espesor relativo del perfil	Coefficiente de sustentación máximo	CRITERIOS	Análisis de materiales de aplicación
1	0,5	0,8	1		Coefficiente de sustentación máximo	0,7
0,8	0,6	0,7		1	Espesor relativo de perfil	0,5
1	1		0,5	0,7	Resistencia a la torsión	1
0,9	0,9	0,5	1	1	Fiabilidad estructural	0,5
0,7		0,7	1	0,9	Resistencia a la fatiga	0,9
	1	1	0,8	0,7	Deformaciones y vibraciones	1
0,6	0,9	1	0,9	0,8	Medios de fabricación y estructura	0,8
1	0,8	0,8	0,6	1	Análisis de materiales de aplicación	
7,0	6,7	6,5	6,8	7,1	E+1	57,8
0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	Ponderación	0,94
SUMA:						

Tabla 3. Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas.

Perfil aerodinámico NACA 0021	Perfil aerodinámico NACA 0018	Perfil aerodinámico NACA 0015	TABLA DE ASIGNACIÓN DE ALTERNATIVAS DEL PROYECTO
4	5	5	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN MÁXIMO
3	4	4	ESPESOR RELATIVO DE PERFIL
4	4	5	RESISTENCIA A LA TORSIÓN
3	5	4	FIABILIDAD ESTRUCTURAL
4	4	5	RESISTENCIA A LA FATIGA
4	5	5	DEFORMACIONES Y VIBRACIONES
3	4	5	MEDIOS DE FABRICACIÓN Y ESTRUCTURA
3	3	5	ANÁLISIS DE MATERIALES DE APLICACIÓN
28	34	38	TOTAL

Tabla 4. Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas.

Perfil aerodinámico NACA 0021	Perfil aerodinámico NACA 0018	Perfil aerodinámico NACA 0015	Criterios
0,48	0,6	0,6	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN MÁXIMO
0,36	0,48	0,48	ESPESOR RELATIVO DE PERFIL
0,44	0,44	0,55	RESISTENCIA A LA TORSIÓN
0,36	0,60	0,48	FIABILIDAD ESTRUCTURAL
0,48	0,48	0,60	RESISTENCIA A LA FATIGA
0,48	0,60	0,60	DEFORMACIONES Y VIBRACIONES
0,36	0,48	0,60	MEDIOS DE FABRICACIÓN Y ESTRUCTURA
0,33	0,33	0,55	ANÁLISIS DE MATERIALES DE APLICACIÓN
3,29	4,01	,46	E
3	2	1	PRIORIDAD

4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Análisis de incertidumbre en la medición eólica.

Las mediciones indican en el porcentaje de medidas correctas o válidas para su análisis, cuya influencia por medios externos como la ocurrencia de elementos meteorológicos de interrupción de medida no las permite tomarse en cuenta, y un porcentaje final de mediciones no válidas por medios ya indicados, expuestos dentro de la tabla 5.

Tabla 5. Estudio de incertidumbre de la medición eólica.

Estudio de incertidumbre de la medición eólica.						
	JUN.	JUL.	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
TOTAL MEDICIONES	720	744	744	720	744	720
MEDICIONES VÁLIDAS	672	687	698	694	687	656
PORCENTAJE VÁLIDO	93,33%	92,34%	93,82%	96,39%	92,34%	91,11%
MEDICIONES NO VÁLIDAS AGENTES EXTERNOS	37	25	32	23	21	49

PORCENTAJE NO VÁLIDO	5,14%	3,36%	4,30%	3,19%	2,82%	6,81%
MEDICIONES NO VÁLIDAS INCERTIDUMBRE	11	32	14	3	36	15
PORCENTAJE NO VÁLIDO	1,53%	4,30%	1,88%	0,42%	4,84%	2,08%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Distribución de velocidades.

Después del análisis del emplazamiento, tanto en longitud, latitud, altitud, y la densidad del aire, se procede a la clasificación de la información obtenida por el Data Logger de la herramienta de medición, desde una perspectiva general promedio de velocidades mensuales como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Registro ménsula de velocidades Junio 2015 -Noviembre 2015.

CAPTACIÓN EÓLICA GLOBAL PROMEDIO						
JUNIO 2015 - NOVIEMBRE 2015						
	jun-15	jul-15	ago-15	sept-15	oct-15	nov-15
PROMEDIO MENSUAL	1,10	0,93	0,94	0,90	0,92	0,91
PROMEDIO PRODUCTIVO	1,94	1,56	1,53	1,46	1,51	1,49
VALOR MÁXIMO MENSUAL	3,07	2,40	2,35	2,86	2,45	2,36

La variación entre las medidas mensuales es el promedio mensual, promedio productivo y valor máximo, entre sus puntos máximos y mínimos es de 18,18% en el primer caso, 24,74% en el segundo y 23,45% en el último parámetro respectivamente. De esta forma, en la figura 1 se observa la variabilidad del viento en los meses analizados.

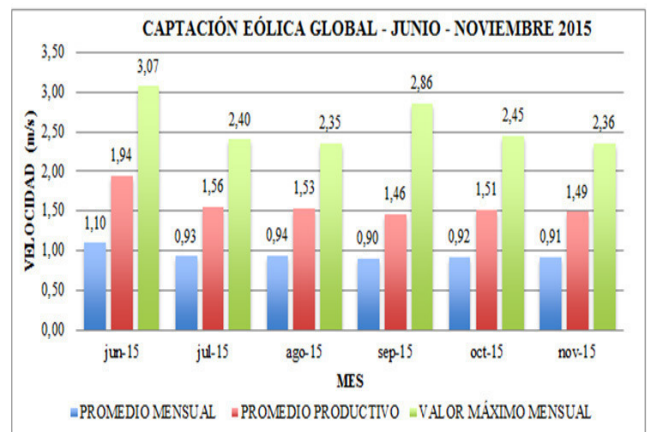


Figura 1. Variabilidad de la captación eólica global.

Porcentual de ocurrencia de velocidades.

De la obtención del perfil promedio de velocidades por horario, se obtiene el porcentual de ocurrencia de velocidades por horario correspondiente al gráfico de variabilidad de la velocidad del viento, formando perfiles que en muchos de los casos son similares en la mayoría de los meses, existiendo variación en ocasiones cuando la presencia de temporales es muy alta, en cambios de estación climática o en medios de medición donde la afección de agentes externos ha sido elevada en esos tiempos, registrándose dichos datos en la tabla 7.

Tabla 7. Porcentual de ocurrencia de velocidades.

VELOCIDAD M/S	JUN. %	JUL. %	AGO. %	SEP. %	OCT. %
0 - 1	41,50	46,1	52,5	51,23	48,23
1 - 2	40,2	53,9	47,5	48,77	51,77
2 - 3	17,3	0,00	0,00	0,00	0,00

Con base en el porcentual de ocurrencia de velocidades [4] [5], cuyos porcentajes están expuestos dentro de la tabla anterior, se expone a continuación la distribución de Weibull dentro del promedio productivo de captación para el respectivo emplazamiento, tal como se observa en la figura 2.



Figura 2. Distribución de weibull - promedio productivo

Potencia adquirible y eficiencia del aerogenerador.

A partir de las deducciones anteriores, de forma teórica se desprende la potencia eólica disponible, para utilización de este parámetro dentro del campo factible de la institución de proyectos eólicos, aparece la conformación de la terminología técnica denominada “potencia eólica aprovechable”.

El cumplimiento de la ecuación (1) de la conservación de la masa ocasiona que no toda la potencia disponible del aire pueda ser utilizada, siendo afectada por las pérdidas mecánicas en la transmisión y la eficiencia mecánica del sistema de

transformación de la energía cinética en energía mecánica. La obtención paramétrica de la potencia adquirible del viento parte de la ecuación:

De esta forma en las ecuaciones (1) y (2), teniendo un registro de velocidades cuya incidencia se encuentra en parámetros de velocidades mínima 1 m/s y pico de 3m/s, con una densidad del aire para el sector del desplazamiento de 0,9354 kg/m³ y un diámetro estimado de captación de 700mm se especifica una potencia disponible mínima y máxima aproximada de:

$$P_{disp-min} = \frac{1}{2} \cdot t \cdot A \cdot v_{min}^3 \quad (Ec.1.1)$$

$$P_{disp-min} = \frac{1}{2} \cdot (0,9354) \cdot \left(r \cdot \frac{(0,7)^2}{4} \right) \cdot (1)^3$$

$$P_{disp-min} = 0,18W$$

$$P_{disp-máx} = \frac{1}{2} \cdot t \cdot A \cdot v_{máx}^3 \quad (Ec.1.2)$$

$$P_{disp-máx} = \frac{1}{2} \cdot (0,9354) \cdot \left(r \cdot \frac{(0,7)^2}{4} \right) \cdot (3)^3$$

$$P_{disp-máx} = 4,85W$$

La velocidad de arranque mínima del aerogenerador en eje vertical es 1 m/s, manteniendo un régimen nominal de producción promedio de 4,85W a una velocidad de 3 m/s, aún cuando aquí no se considera la medida de coeficiente de eficiencia de producción del aerogenerador.

En cuestión a la facilidad de construcción para introducción de aletas de perfil NACA 15, se seleccionó un medio de construcción de tipo vertical, por lo que de acuerdo a esta disposición de potencia la eficiencia del aerogenerador con este tipo de paletas se encontraría en un rango entre 0,33 y 0,45, basado en los resultados obtenidos de la investigación sobre las velocidades del aerogenerador cuando se encuentra expuesto a

vientos entre 2 y 4 m/s, se determina el comportamiento del aerogenerador conociendo el tipo constructivo del mismo, con seguimiento de las rpm's potenciales que experimentaría, según se verifica en la figura 3 como sistema ideal.

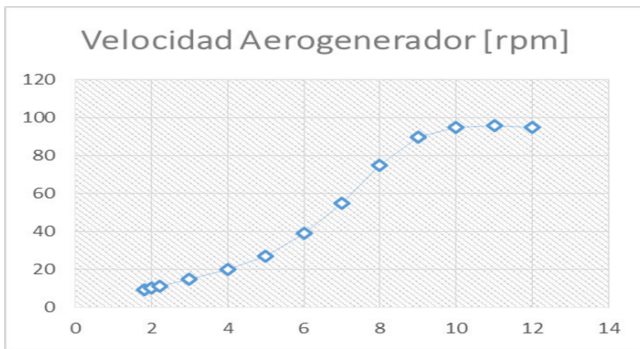


Figura 3. Comportamiento aerogenerador eje vertical rpm's

Descripción

Se parte de una descripción general de características constructivas del aerogenerador, tomadas de diseños genéricos de prototipos previos desarrollados bajo configuración de eje vertical. Tomando en cuenta la facilidad de diseño [2][3], material de elaboración, resistencia al giro y autoprotección, entre otras características.



Figura 4. Diseño base de construcción de aerogenerador

En la figura 4, el aerogenerador de eje vertical cuenta de 3 perfiles

aerodinámicos [6], los mismos que están sujetos al eje central por medio de dos barras de sujeción (superior e inferior), las cuales posteriormente girarían en dirección de la proyección del viento, para obtención de potencia generada al motor potencial para su uso final [7].

Se requiere un aerogenerador de un torque relativamente bajo, esto lleva a la elección de aquellos generadores que utilizan tecnología Brushless (Figura 5). Esta tecnología elimina todo tipo de carbones o escobillas en los ejes de los motores, reduciendo de gran manera el torque necesario para empezar el movimiento. Son los generadores con mayor eficiencia en el mercado, aunque una desventaja es su costo, ya que son 3 veces más costosos que los generadores convencionales.

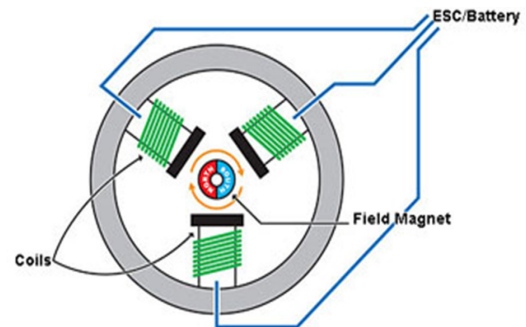


Figura 5. Funcionamiento sistema Brushless en un motor.

El principio de funcionamiento de la tecnología Brushless, que elimina todo tipo de escobillas o carbones entre el estator y rotor, el eje de movimiento (Field Magnet) es acoplado al eje del aerogenerador, y el cambio de polaridad que genera en las bobinas (Coils) hace posible la generación de energía.

Especificaciones técnicas del motor

Después de una búsqueda de motores potenciales para el proyecto eólico de introducción en medios de producción agrícola, para tener como base para

especificación de características de diseño del aerogenerador, el motor con las características de la tabla 9.

MARCA	SAIAMPOWER
Potencia nominal	50W/150 rpm
Potencia pico	75W
Velocidad de arranque	10 rpm
Velocidad de trabajo nominal	80 rpm
Velocidad máxima de autoprotección	150 rpm
Voltaje Pico	28 VAC
Voltaje nominal	15 VAC
Corriente nominal	15 mA
Corriente piso	36 mA
Ruido	≤ 40 dB
Rotor	
Peso	3KG
Otras características	
Tipo de generador	3-fases AC PM
Tipo de tecnología	Brushless
Temperatura de trabajo	30 - 50 °C

Figura 6. Especificaciones técnicas motor SAV-75W, Fuente: SAIAMPOWER (2015) / Manual de motores.

La caracterización del aerogenerador de eje vertical [16], cuyos esquemas estructurales manejan perfiles aerodinámicos lineales de tipo NACA, así:

- Base rectangular de un metro cuadrado de área, con soportes diagonales para sujeción y ubicación del eje vertical del soporte del aerogenerador, tomando en cuenta una ubicación de separación de los perfiles aerodinámicos con radio de 32,1 cm.
- Patas de sujeción a la superficie de ubicación en tierra con una altura de 42 centímetros, que permiten reducir la influencia del desprendimiento de la capa límite del viento tomado en cuenta como fluido, ya que la ubicación es cercana a una pendiente

pronunciada. La altura del eje es de 1 metro con 6 centímetros incluyendo las sujeciones, con una altura de los perfiles aerodinámicos de 1 metro 50 centímetros, lo que da una altura total de la estructura de 2 metros con 13 centímetros.

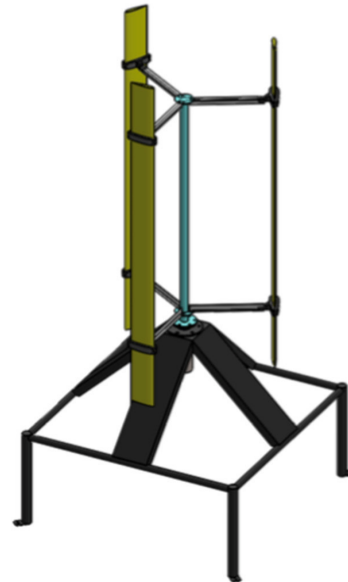


Figura 7. Vista tridimensional diseño estructural del prototipo

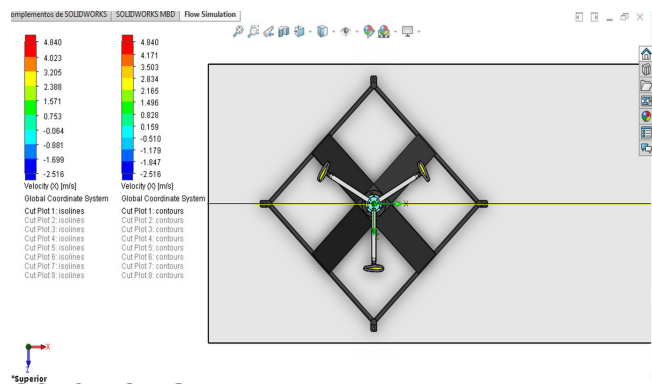


Figura 8. Vista superior primer punto crítico.

En la simulación de la estructura para verificarsu comportamiento con respecto al paso del viento, considerándolo como un fluido, para razón de un primer punto crítico (Figura 8), la simulación de la vista lateral presenta un comportamiento seguro para la captación de la velocidad del viento en este punto, con zonas de

turbulencia menores que no provocarían inconvenientes en la seguridad de la estructura.

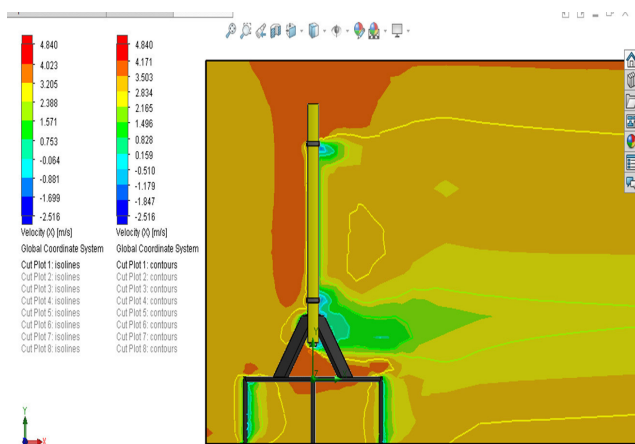


Figura 9. Simulación vista lateral primer punto crítico

En el segundo punto crítico (Figura 9), el comportamiento del aerogenerador a la captación del viento desde un medio horizontal ideal con flujo nominal es mejor aún que en el primer punto crítico. Se evidencian puntos de captación sin interferencia de comportamiento aerodinámico, debido en gran parte a la conformación de la forma de los perfiles bajo estructura NACA 0015.

Análisis de selección de materiales y construcción

Verificando que todos los puntos críticos de la estructura se comportan de acuerdo a los estimado, al momento de la construcción se siguen los medios de análisis de selección de materiales para la elaboración del prototipo [19]. El esquema de construcción por definición de materiales se expone de acuerdo a: Perfiles NACA, brazos sujetadores y del eje principal, base de colocación y parte rígida de soporte a tierra.

Para la construcción de los perfiles NACA, se utilizó un tipo de plástico denominado PLA, cuyas características mecánicas son: altamente resistente a la variación de temperaturas, que es lo

que se requiere para que el generador se encuentre a la intemperie, alta resistencia a la tracción y manejable a altas temperaturas.

El aluminio que se utilizó en los brazos para sujetar a los perfiles NACA, es aluminio con forma de "T" para obtener una mayor rigidez en el centro del brazo y evitar así fatiga mecánica y/o torsión en la longitud del brazo. Las características del perfil en forma de T se especifican dentro de la Figura 10.

Referencia	Base (B)		Altura (A)		Espesor mm	Peso kg/m
	mm	in	mm	in		
1001	25.40	1	25.40	1	1.60	0.219

Figura 10. Características del aluminio – brazos de sujeción, Fuente: Manual CEDAL.

En cuestión del eje vertical, por cuestión de desarrollo y formulación del mejoramiento del comportamiento de la estructura a la resistencia al paso del viento se seleccionó el perfil tubular con las siguientes características presentadas en la Figura 11.

Referencia	Diámetro (D)		Presión		Espesor mm	Peso kg/m
	mm	in	PSI	Km/cm2		
1013	76.20	3	540.54	38.06	1.27	0.810

Figura 11. Características de aleación de aluminio – eje vertical, Fuente: CEDAL

Evaluación de Compatibilidad

Del análisis de influencia con el entorno circundante, su afección de forma directa e indirecta con los medios de contaminación visual [19], auditivo, de interferencia con el hábitat y ecosistemas existentes en el emplazamiento, se evidencian los siguientes factores:

- El impacto visual del emplazamiento es considerado mínimo, en razón a que la estructura mantiene un tamaño disminuido, con la inclusión

de perfiles aerodinámicos NACA 0015 de dimensiones cortas ya que el medio metodológico de captación por eje vertical para su alcance dentro de las metas agrícolas es de pequeña producción.

- La contaminación sonora en el emplazamiento es prácticamente ninguna, considerando que el nivel de giro obtenido por el aerogenerador no alcanza su medida nominal, además que la presencia de perfiles aerodinámicos NACA 0015 ayudan a reducir la oposición del giro al paso del fluido por ella.
- En cuestión a la afección directa e indirecta sobre la fauna y flora que se encuentra cercano al punto de ubicación del prototipo, es importante mencionar que se visualizó poca presencia de medios vegetales y animales en el punto de medición y experimentación, siendo un lugar indicado para la ubicación y posterior utilización del prototipo dentro de medios pedagógicos y de mejoramiento del esquema de captación eólica.

5. CONCLUSIONES

- Mediante la revisión bibliográfica, teórica, técnica y metodológica se establecieron las posibles alternativas para generación de electricidad con sistemas convertidores de energía. Un aerogenerador de flujo turbulento orientado a suministro energético para producción agrícola a baja escala.
- Una vez realizado el estudio en sitio para el emplazamiento, se evidencia una elevada presencia de velocidades comprendidas entre 1 m/s y 2 m/s con un 69,05% de participación total, seguida con un 20,48% para las velocidades entre 2 m/s y 3 m/s, un 10,24% para las velocidades

iniciales, consideradas de arranque, y un 0,24% final para presencia de velocidades en el rango entre 3 m/s y 4 m/s.

- Los parámetros de diseño de un sistema de aerogeneración orientado al suministro energético para producción agrícola familiar, evaluando la conformación y validación de prototipos efectivos para la solución de la problemática presentada y estructurando la factibilidad de tipo teórico – técnica, económica y de afección social, de manera conjunta con el estudio de la relación costo – beneficio del objeto de estudio.
- La selección de un aerogenerador de eje vertical de tipo Savonius, especialmente el esquema desarrollado para aerogeneradores Windspire como este proyecto, es debido a las velocidades de referencia que está entre 1 m/s y 4,5 m/s, donde además se estableció un juego de tres paletas altas y superficies de sustentación para una mayor aerodinamicidad.
- Se seleccionó como prioridad de construcción el perfil aerodinámico NACA 0015, teniendo como segundas opciones los perfiles NACA 0018 y NACA 0021 en ese orden respectivamente.
- En la velocidad del viento se evidencia un valor mayor de 1,61 m/s, un factor de escala de 1,78 m/s y finalmente un factor de forma de 2,98. Es importante resaltar finalmente que la velocidad máxima medida durante el período de tiempo fue de 5,07 m/s para el mes de junio, siendo el punto de referencia en consideraciones de medios de producción y estabilidad del diseño con respecto al nivel de rafagosidad presente en el emplazamiento.
- Para verificar el comportamiento del aerogenerador en presencia de carga, la simulación de la vista lateral presenta un comportamiento

seguro para la captación de la velocidad del viento en este punto, con zonas de turbulencia menores que no provocarían inconvenientes en la seguridad de la estructura. En un segundo punto crítico, el comportamiento del aerogenerador a la captación del viento desde un medio horizontal ideal con flujo nominal es mejor aún que en el primer punto crítico. Se evidencian puntos de captación sin interferencia de comportamiento aerodinámico, debido en gran parte a la forma de los perfiles de sustentación NACA 0015.

- Los valores de captación eólica en el punto determinado, además de la medición de rpm obtenidas por el mencionado aerogenerador que, dentro del período productivo de medición establecido entre las 13:00 y las 18:00 son: valores en rangos entre 2.2 m/s y 4.9 m/s, habiendo registrado además valores de rafagosidad momentáneos de 6.8 m/s.

6. REFERENCIAS

- [1] Agencia Insular de Energía de Tenerife. (2010). Información general sobre energía eólica. Tenerife, España: AITE.
- [2] Antezana, J. C. (2004). Diseño y Construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- [3] Arbeloa, L., & Zurita, J. (2012). Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural. Pamplona, España: UPNA.
- [4] Borrel, F. (2013). Revisión de la Ley de Betz. Madrid, España: Independiente.
- [5] Canut, A. M., Guerra, F. J., Guzmán, B., & Struck, A. (2008). Número de Reynolds. México D.F., México: Iberoamericana.
- [6] Castillo, F., Montiel, R., Chacón, M., Chairizi, N., Ramijohn, A., & Barón, R. (2011). Práctica No.2 Perfiles aerodinámicos. Maracaibo, Venezuela: ZULIA.
- [7] Chávez, S. (2010). Diseño de un microgenerador de eje vertical. México D.F., México: UNAM.
- [8] CONELEC. (2014). Desarrollo de la energización rural y la electrificación urbano marginal. Quito, Ecuador: CONELEC.
- [9] Escudero, J. M. (2008). Manual de energía eólica. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- [10] FINDER. (2011). El mundo sustentable de las energías renovables. Buenos Aires, Argentina: FINDER COMPONENTES LTDA.
- [11] FING. (2012). Nociones generales de energía eólica. Montevideo, Uruguay: URU.
- [12] Fundación Energías Renovables. (2013). El camino hacia un modelo energético sostenible. Madrid, España: F.E.R.
- [13] Letcher, T. (2012). Small Scale Wind Turbines Optimized for Low Wind Speeds. Columbus, Estados Unidos: The Ohio State University.
- [14] Mattio, & Tilca. (2009). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección del viento. Buenos Aires, Argentina: CREE.
- [15] Mur Amada, J. (2012). Curso de Energía Eólica. Zaragoza, España: IE.

[16]Pérez Ramírez, R. (2006). Diseño y construcción de un pequeño aerogenerador de 100W para su aplicación en zonas indígenas de México. Zaragoza, España: Unizar.

[17]Rudnick Van De Wyngard, H. (2012). Energía Eólica. La generación eólica. Santiago de Chile, Chile: UCC.

[18]Sánchez, C., Salva, J., Fraga Enrique, & Guevara, P. (1990). Estudio sobre la aplicación de la energía eólica en regadíos con agua a presión en la comarca de ordenación de explotaciones de las islas de Gran Canaria, Fuerteventura y La Palma. Madrid, España: Fundación Universidad Impresa.

[19]Sheldahl, R. E., & Klimas, P. C. (1981). Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Trough 180-Degree Angle of Attack for use in aerodynamic analysis of Vertical Axis Wind Turbines. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.

[20]SOLVENTA. (2004). Introducción a las energías renovables. Santander, España: Independiente.

[21]Studer, I. (2014). Energías Renovables para la competitividad en México. Moterrey, México: IGS.

[22]Suárez, Á. (2010). Generador eólico de eje vertical WM. Madrid, España: WM.

[23]Zenit, R. (2013). Ingeniería de flúidos. La turbulencia. México D.F., México: UNAM.



¹Sinchiguano M. Germánico. Nacido en la ciudad de Latacunga. Graduado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en la carrera de Ingeniería en Electromecánica, Docente en la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas en la carrera de Electromecánica



²Vicente de la Dolorosa Córdova Yanchapanta. Master of Science Ball State University, USA Ball State University, USA 2003 Doctor Of Science Ed. Diss: Regional Scale Carbon Flux Estimation Using Modis Imagery 2005.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	14 mayo 2016
Fecha aceptación	4 diciembre 2016

7. BIOGRAFÍA