Construcción de un Aerogenerador de Eje Vertical Tipo Savonius con Sistema de Medición de Giro

Manuel Fernando Tello Yépez

Universidad Internacional SEK

Nota de Autor

Manuel F. Tello Yépez, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Internacional SEK; Director Ingeniero Gustavo Moreno.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

mtello.mec@uisek.edu.ec

Índice de Contenido

Introducción 12
Justificación 12
Objetivo 12
Estado del Arte 13
Producción Energética Mundial. 14
Producción Energética Nacional 15
Energía Eólica 18
Aprovechamiento del viento 19
Velocidad del viento 19
Medición del viento 20
Medida de la velocidad 20
Medida de la dirección 21
Obtención de Datos 22
Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura 24
Rendimiento aerodinámico 24
Distribución de Weibull1 25
Aerogeneradores de eje vertical 26
Rotor Darrieus 27
Rotor Savonius 28
Método 30
Diseño Mecánico 30
Aspas 33
Estructura 39
Diseño eléctrico 45
Diseño Software 46
Hardware y Software 46
Arduino 46
Diagrama de Flujo 50
Resultados 53
Discusión 60
Conclusiones 60
Recomendaciones 61
Referencias 63
Anexos 65

Índice de Figuras

Figura 1. Porcentaje de producción energética mundial. (IEA, 2016) 14
Figura 2. Porcentaje de electrificación mundial. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012) .. 15
Figura 3. Producción energética nacional. (ARCONEL, 2016) 16
Figura 4. Consumo energético nacional. (ARCONEL, 2016) 16
Figura 5. Parque Eólico Villonaco-Loja. (MEER, 2016) 17
Figura 6. Parque Eólico Baltra-Galápagos. (MEER, 2015) 17
Figura 7. Ejemplo de rosa de los vientos. (MEER, 2016) 20
Figura 8. Ejemplo de Anemómetro de rotación. (DIRECT INDUSTRY, s.f.) 21
Figura 9. Ejemplo de Veleta. (Moreno Figueredo, s.f.) 22
Figura 10. Velocidad del Viento en Ecuador según atlas eólico. (MEER, 2016) 22
Figura 11. Velocidad del viento en provincia de Pichincha según atlas eólico. (MEER, 2016) 23
Figura 12. Dirección del viento en Ecuador según atlas eólico. (MEER, 2016) 23
Figura 13. Perfil vertical de la velocidad del viento. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012) 24
Figura 14. Rendimiento aerodinámico según tipo de aerogenerador y número de palas. (Canalejo Sánchez & Font, 2011) 25
Figura 15. Ejemplo de Distribución de Weibull. (MEER, 2016) 26
Figura 16. Ejemplos de aerogeneradores de eje vertical. (Monografías, 2010) 27
Figura 17. Rotor Darrieus. (Verde Zona, 2015) 28
Figura 18. Rotor Savonius. (Ingeni-Arte, s.f.) 29
Figura 19. Datos anemómetro Universidad SEK. 31
Figura 20. Diseño de Aspas. 34
Figura 21. Diseño de Rotor. 34
Figura 22. Análisis de resistencia según Von Mises. 35
Figura 23. Análisis de desplazamiento de resistencia. 35
Figura 24. Factor de Seguridad. 36
Figura 25. Análisis de falla. 37
Figura 26. Análisis de desplazamiento de falla. 37
Figura 27. Termo conformado de las aspas. 39
Figura 28. Análisis de resistencia según Von Mises. 40
Figura 29. Análisis de desplazamiento de resistencia. 40
Figura 30. Análisis de Factor de seguridad. 41
Figura 31. Análisis de falla. 42
Figura 32. Análisis de desplazamiento de falla. 42
Figura 33. Diseño de Estructura. 43
Figura 34. Marco de aerogenerador tipo Savonius. 44
Figura 35. Aerogenerador con eje y aspas instaladas. 44
Figura 36. Diagrama eléctrico. 45
Figura 37. Frontal y reverso de placa de Arduino Uno. (Arduino.cc, 2017) 46
Figura 38. Elementos de placa Arduino Uno. (Lledó Sánchez, 2012) 47
Figura 39. Programa en software Arduino 1.8.3. 49
Figura 40. Diagrama de Flujo programa. 50

Figura 41. Diagrama de Flujo función guardar_rpm. 51
Figura 42. Instalación de maqueta. 53
Figura 43. Maqueta en funcionamiento. 53
Figura 44. Funcionamiento de maqueta en su ubicación. 54
Figura 45. Vegetación alta en la proximidad de la maqueta. 54
Figura 46. Conexión eléctrica sistema de medición de giro. 55
Figura 47. Conexión eléctrica, energización de sistema. 55
Figura 48. Energización con batería. 56
Figura 49. Visualización de datos en formato de Excel. 56

Índice de Tablas

Tabla 1. Producción energética mundial en TWh. (IEA, 2016)..... 14
Tabla 2. Características de rotores típicos. (Canalejo Sánchez & Font, 2011) 27
Tabla 3. Datos anemómetro Universidad SEK..... 30
Tabla 4. Datos obtenidos de Atmosfheric Science Data Center. (Atmosfheric Science Data Center, 2016)..... 31
Tabla 5. Análisis de resistencia según Von Misses..... 36
Tabla 6. Análisis de falla según Von Misses. 38
Tabla 7. Análisis de resistencia según Von Misses..... 41
Tabla 8. Análisis de falla según Von Misses. 43
Tabla 9. Especificaciones Técnicas Arduino Uno. (Arduino.cc, 2017) 47
Tabla 10. Mediciones tomadas por la maqueta. 57
Tabla 11. Costos de materiales de construcción 58
Tabla 12. Costos de procesos de construcción. 59

Índice de Ecuaciones

Ecuación [1]…… 32

Ecuación [2]…… 33

Ecuación [3]…… 33

Ecuación [4]…… 33

Índice de Anexos

Anexo A. Planos de maqueta

Anexo B. Programación Sketch Arduino

Anexo C. Datasheet Arduino

Anexo D. Datasheet Encoder Arduino

Anexo E. Datasheet Micro SD Card Arduino

Anexo F. Datasheet Rodamientos

Anexo G. Datasheet Metil-metacrilato (PMMA)

Agradecimiento

A Dios, porque a pesar de las dificultades atravesadas, me dio la fuerza necesaria para luchar y culminar mis estudios universitarios.

A mis padres, por el apoyo que me dieron a lo largo de mi vida.

A mi familia.

A mi novia y a su familia, por el cariño brindado cada uno de los días.

En especial a mi hija, que me da fuerza para seguir adelante por el resto de mi vida.

A la Universidad SEK, en especial a la facultad de Ingeniería Mecánica por abrirme las puertas de la institución para cumplir con mis sueños.

Dedicatoria

A mis padres que siempre me apoyaron en mis estudios, a toda mi familia por tomarse un poco de tiempo para aconsejarme y darme su cariño.

A Maite, mi novia, por su amor y apoyo en salir siempre adelante y conseguir mis metas.

A mi hija, que es lo más importante que tengo en mi vida y es la que me da fuerza cada uno de mis días.

A mis verdaderas amistades.

Resumen

Este proyecto describe el cálculo, diseño y construcción de una turbina de viento de eje vertical tipo Savonius, además, la programación de un microcontrolador para medir la velocidad de rotación del rotor que será impulsado por la fuerza del viento.

Este trabajo aportará la información recogida en el estudio, cálculo, diseño, construcción, programación y resultados del rotor Savonius, que se instalará en la Universidad Internacional SEK, ubicada en el sector de Carcelén, a una altura de aproximadamente 5 metros Sobre el nivel del suelo.

En la parte inicial del proyecto, se estudia la situación energética mundial, en Sudamérica y especialmente en el país de Ecuador, además de la historia de la energía, su importancia hoy en día y algunos tipos de energía alternativa, especialmente la eólica.

A continuación, se analizará el sitio donde se instalará el modelo y se estudiará el recurso eólico disponible en la zona a partir de datos procedentes de una estación meteorológica instalada en la entrada principal de la Universidad y de una base de datos encontrada en Internet.

Posteriormente, se realizaron los cálculos necesarios para ambos diseños, mecánicos y eléctricos, y se explican las partes que intervendrán en la construcción del modelo.

Finalmente, se presentan los planos de construcción y el coste de fabricación del modelo, también datos técnicos de todos los elementos utilizados en la construcción.

Abstract

This project describes the calculation, design, and construction of a vertical axis wind turbine type Savonius, additionally, the programming of a micro controller in order to measure the rotational speed of the rotor that will be impulsed by the force of the wind.

This paper will provide the information collected in the study, calculation, design, construction, programming, and results of the rotor Savonius, which will be installed at the International University SEK, located in the sector of Carcelen, at a height of approximately 5 meters over the ground level.

In the initial part of the project, the world energy situation is studied, in South America and especially in the country of Ecuador, in addition to the history of energy, its importance today and some types of alternative energy especially the eolic.

Next, the site where to install the model will be analyzed and the wind resource available in the zone will be studied based on data taken from a meteorological station installed at the main entrance of the University, and from a data base found on the internet.

Subsequently, the necessary calculations were made for both designs, mechanical and electrical, and the parts that will intervene in the construction of the model, are explained.

Finally, construction drawings and the manufacturing cost of the model are presented, also technical data of all the elements used in the construction.

Introducción

Justificación

Las energías renovables, como la energía solar, energía eólica, la energía hidráulica son ilimitadas, y además no contaminan el ambiente y por lo tanto son más saludables. El estudio de energías renovables en general a partir de la energía eólica en particular es muy importante en la actualidad, debido al alza de los precios del petróleo (motivación económica) y al calentamiento global (motivación medio ambiental). Por otro lado, en estos días no es suficiente "producir energía" sino hacerlo con una alta eficiencia.

La situación que se vive en el planeta debido a la contaminación producida por la utilización de energía generada de combustibles fósiles, ha obligado a tomar alternativas como las energías renovables para reducir en cierta medida el daño ecológico causado.

El aprovechamiento de la energía eólica es una de las opciones para detener y mitigar los daños que la sociedad ha causado y causa en la naturaleza, es por eso que se requiere de equipos y sistemas en los cuales se implementen las diferentes aplicaciones de la energía.

En base a los criterios mencionados en los párrafos anteriores, se fundamenta la decisión de diseñar y construir un dispositivo aerogenerador de eje vertical, adaptado a un sistema de medición de velocidad de giro, con el propósito de analizar el rotor tipo Savonius y la forma de sus aspas, encontrar la razón por la cual es catalogado como el rotor de menor eficiencia y de esa forma fomentar la investigación dentro del campo de las energías limpias, en especial el Savonius.

La importancia radica en desarrollar un sistema aerogenerador basado en la energía eólica, demostrando que sus aplicaciones están al alcance y comprobar que este tipo de sistema posee la factibilidad económica para poder implementarse dentro de cualquier ámbito, lo cual no se podría hacer con los generadores eólicos de eje horizontal por su infraestructura.

Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es la construcción e implementación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, con la adaptación de un sistema de medición de velocidad de giro con su respectiva programación, en la Facultad de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad SEK campus Carcelén.

Ante una gran demanda de energía eléctrica, se estudiará un tipo de energía que viene en crecimiento como la eólica, y el tipo de aspa que presenta. Se hará simulaciones en software de diseño para lograr una mejor eficiencia. Como parámetros para el diseño se tomará en cuenta un costo bajo de producción, sencilla fabricación y poco mantenimiento.

Estado del Arte

Desde hace mucho tiempo el hombre ha aprovechado las fuentes de energía renovable, básicamente la energía animal hasta la llegada de la "Revolución Industrial", con la aparición del carbón y su bajo costo. Con él aparecieron las máquinas a vapor transformando la energía térmica en mecánica. Posteriormente, el Petróleo fue desplazando al carbón por su mayor poder calórico y su carácter fluido. Después aparece el gas natural, llamado el combustible del siglo XXI, pero no cumplió con el importante papel de suministro mundial.

Pasaron los años, y pensando en el agotamiento de energías fósiles, el progresivo incremento de su coste y en sus problemas medioambientales, nacen las energías renovables. (Méndez Múñiz & Rodríguez Rodríguez, 2012)

Las Fuentes de Energía Renovable son aquellas que continuamente se están regenerando a una velocidad similar a la de su consumo por el hombre. (Villarrubia, 2004). Estas son respetuosas con el medio ambiente, y aunque ocasionan efectos negativos sobre el entorno, son mucho menores que los impactos ambientales de las energías fósiles. Estas fuentes renovables provienen de la energía que el sol aporta a la Tierra en cada momento, la cual se transforma de diferentes maneras.

Clasificación

El sol es la fuente de energía de la Tierra, llega en forma de radiación permitiendo que esta mantenga una temperatura más o menos constante, posibilitando que haya vida. La radiación solar además de proporcionar luz, también es transformada en viento por los gradientes térmicos que se producen en la atmósfera.

Dentro del marco de generación de energías renovables se pueden destacar las que tienen mayor desarrollo tecnológico y por tanto mayores posibilidades de competir en el mercado. El Sol está presente en todas ellas.

- Eólica
- Hidráulica
- Biomasa
- Geotérmica
- Solar
- Mareomotriz

Estas producen las dos formas de energía más utilizadas como: calor y electricidad. (Méndez Múñiz & Rodríguez Rodríguez, 2012)

Producción Energética Mundial.

Las fuentes de energía más utilizadas a lo largo de la historia han sido el carbón, el petróleo, la energía nuclear o el gas natural. En la actualidad, las energías renovables (solar, hidráulica, eólica, etc.) tienen también un papel muy importante. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)

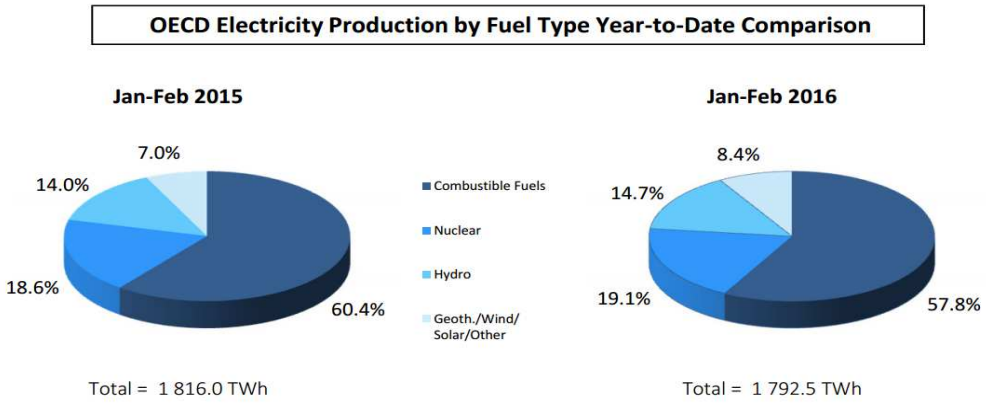

Figura 1. Porcentaje de producción energética mundial. (IEA, 2016)

Tabla 1.

Producción energética mundial en TWh. (IEA, 2016)

Producción energética mundial					
	Últimos tres meses			El año pasado	
Producción Energética mundial	Feb-16	Jan-16	Dec-15	2015	Contribución
Gasolinas combustibles	483.4	552.8	504.6	6204.8	60.30%
Nuclear	163.3	178.5	170.3	1878.8	18.30%
Hidroeléctrica	130.1	133.7	117.1	1424.6	13.80%

Geotérmica/Eólica /Solar/Otras	77.5	73.1	74.8	778.1	7.60%
Índice de producción	**854.4**	**938.1**	**866.8**	**10286.3**	**100.00%**
Importaciones	42.3	46.6	44.4	506.7	
Exportaciones	41.2	46.2	44.5	497	
Suministro de electricidad	**855.5**	**938.5**	**866.7**	**10295.9**	

El Banco Mundial estima que más de 1600 millones de personas no tienen acceso a la electricidad, esto es más del 20% de la población mundial. Sin embargo, la cifra de las personas sin acceso a la electricidad ha bajado, ya que en el año 1970 la estimación era de 1900 millones y en el año 1990 era de 2000 millones.

Si se analiza por regiones, 509 millones de los no electrificados estarían en África Sub-Sahariana, 28 millones en el Sahara, 18 millones en China, 223 millones en el sur de Asia, 800 millones en la India y 56 millones en Sudamérica. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)

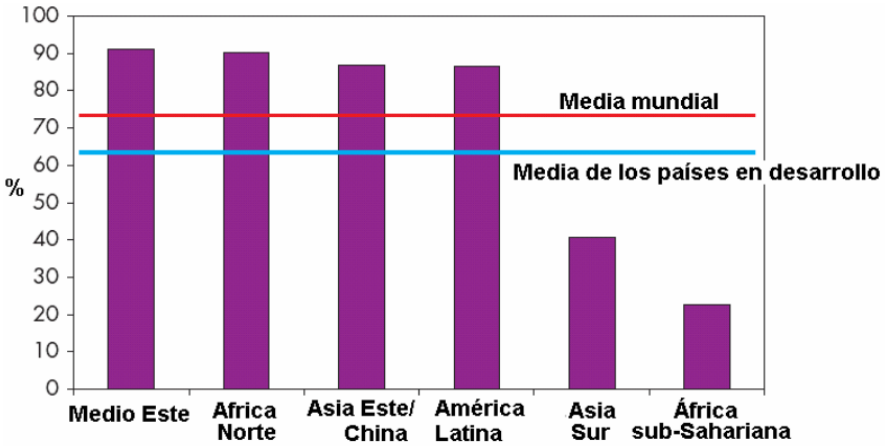

Figura 2. Porcentaje de electrificación mundial. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)

Producción Energética Nacional

El Ecuador, siendo un país rico en fuentes de energía renovable, históricamente ha dependido en gran medida de los combustibles fósiles como fuente de energía. En la actualidad se busca revertir esta situación con un radical cambio en la matriz energética donde la energía renovable sea la protagonista. (MEER, 2016)

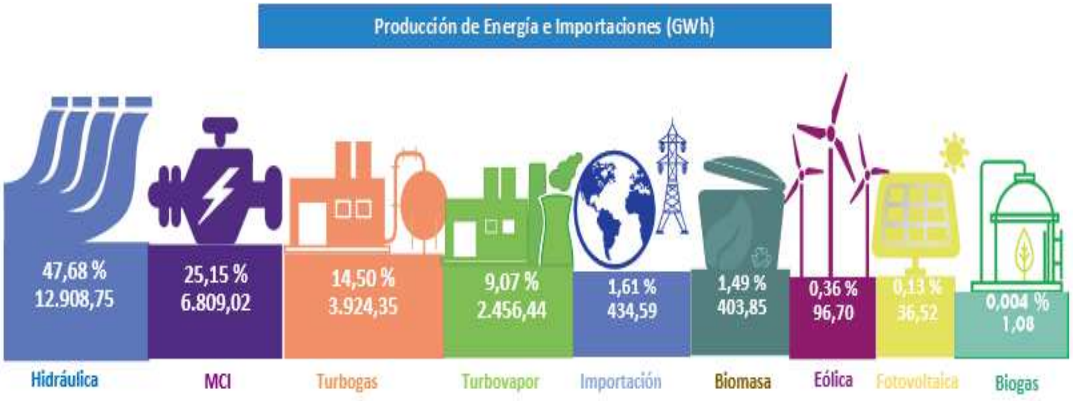

Figura 3. Producción energética nacional. (ARCONEL, 2016)

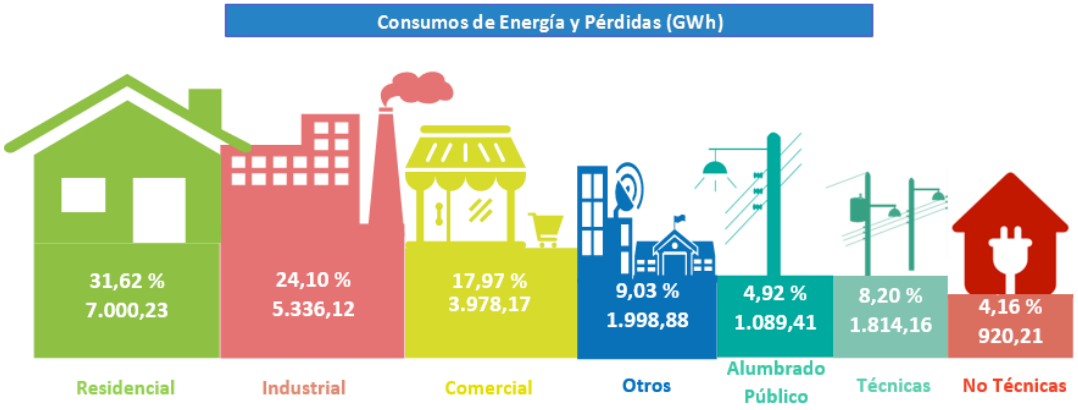

Figura 4. Consumo energético nacional. (ARCONEL, 2016)

En la actualidad el estado ecuatoriano ha desarrollado algunos proyectos eólicos en el país, como lo son: Parque Eólico San Cristóbal en las Islas Galápagos con una potencia instalada de 2,4MW (megavatios), el Parque Eólico Villonaco con 16,5MW y el Parque Eólico Baltra-Santa Cruz ubicado en la provincia de Galápagos, el cual generará 2,5 MW en su primera fase. (MEER, 2016)

Figura 5. Parque Eólico Villonaco-Loja. (MEER, 2016)

Figura 6. Parque Eólico Baltra-Galápagos. (MEER, 2015)

Energía Eólica

El sol provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos. La energía del viento se deriva del calentamiento diferencial de la atmósfera por el sol, y las irregularidades de la superficie terrestre.

El dispositivo capaz de transformar la fuerza del viento en electricidad es un aerogenerador, que consiste en un mecanismo de rotación provisto de palas, y de un generador eléctrico con el eje solidario al sistema motriz, de forma que el viento hace girar las palas y el rotor del alternador, transformando esta energía mecánica de rotación en energía eléctrica.

Las principales aplicaciones son:

- Bombeo de agua
- Electrificación rural
- Demandas de pequeña potencia
- Al agruparse forman parques eólicos conectados a la red eléctrica. (Méndez Múñiz & Rodríguez Rodríguez, 2012)

La energía eólica es una fuente de energía que dispone de una tecnología madura, por lo que su explotación es técnica y económicamente viable.

Ventajas

- No hay emisión de gases contaminantes, y no utiliza agua.
- No requiere procesos de extracción.
- Su uso y explotación no implica riesgos ambientales de gran impacto.
- Ahorra combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.

Problemática

- El viento es disperso, de gran variabilidad y fluctuación (tanto en velocidad como en dirección), por lo que todos los lugares no son adecuados.
- Aumento del nivel de ruido.
- Impacto visual.
- Impacto sobre la fauna, en particular sobre las aves.
- Ocupación del suelo, requieren un área considerable.

- Interferencia con transmisiones electromagnéticas, los rotores de las centrales pueden producir interferencia con los campos electromagnéticos y afectar a la transmisión de señales. (Villarrubia, 2004)

Aprovechamiento del viento

En cada uno de los pasos de conversión hay una serie de pérdidas, por lo que solamente un pequeño porcentaje del total de energía absorbida por la superficie terrestre se convierte en viento. A parte de estas pérdidas, también hay que tener en cuenta que del viento no se puede extraer toda la energía. Así lo explica la Ley de Betz, en la cual se concluye que solamente puede extraerse el 56% de la energía del viento. (Villarrubia, 2004)

Velocidad del viento

A pesar de las muchas ventajas que tiene la energía eólica (no agresiva con el medio ambiente, inagotable, sostenible), hay que tener en cuenta que tiene el inconveniente de que el viento es disperso y aleatorio. El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor es la diferencia de presiones y su movimiento está influenciado por el giro de la Tierra. La velocidad del viento es una magnitud vectorial y ésta varía de forma aleatoria tanto en módulo como en dirección y sentido. Los valores medios suelen encontrarse entre 3 y 7 m/s. Sin embargo, dependiendo de la altitud y la topografía éstos pueden ser mayores o menores (valores mayores en altas montañas, valles estrechos y costas).

Para visualizar de forma más clara de donde proviene el viento se utiliza la rosa de los vientos. Para elaborarla se divide el horizonte circular de 360º en 8, 10, 12 o 16 divisiones, teniendo en cuenta los cuatro puntos cardinales (Este=90º, Sur=180º, Oeste=270º y Norte=360º) y se dibuja la dirección de donde proviene el viento. De esta forma se consigue determinar la dirección dominante de los vientos, que por lo general no coincide con la intensidad del viento, ya que en muchos casos lo vientos más intensos no son los que soplan más horas al año procedentes de una determinada dirección. (Villarrubia, 2004)

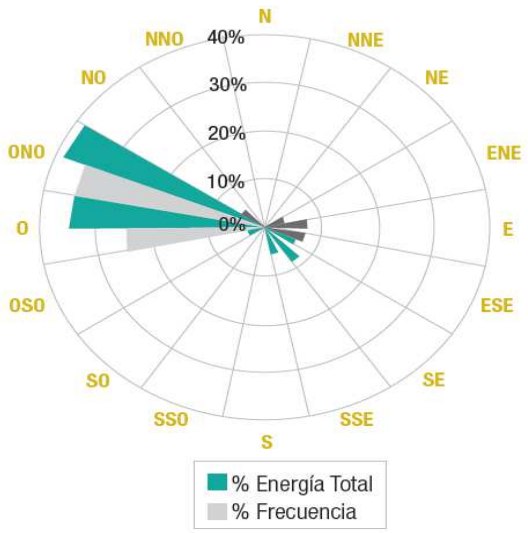

Figura 7. Ejemplo de rosa de los vientos. (MEER, 2016)

Medición del viento

Para realizar una correcta medición del viento, se debe medir tanto su velocidad como su dirección. Por ello, serán necesarios un anemómetro y una veleta respectivamente.

Además, hay que tener en cuenta que datos obtenidos durante una campaña de medición de un año son poco representativos, dada la variabilidad del viento. Para que los datos sean representativos, la información eólica debe ser de periodos entre 25 y 30 años, aunque si esto no es posible los datos recogidos entre 5 y 10 años ya comienzan a ser bastante representativos. (Villarrubia, 2004)

Medida de la velocidad

Anemómetro

Los anemómetros son instrumentos para medir la velocidad del viento. Éstos miden la velocidad instantánea del viento, sin embargo, las ráfagas de viento desvirtúan la medida que recogen si lo que se quiere es tener una idea de velocidades medias. Por ello, para conocer velocidades medias lo mejor es realizar diferentes mediciones en intervalos de unos 10 minutos y tomar como medida válida el valor medio de todas las mediciones llevadas a cabo.

Para hacerlo existen diferentes tipos de anemómetros:

- Anemómetro de rotación: dispone de cazoletas o hélices unidas al eje central, cuyo giro es proporcional a la velocidad del viento y se queda registrado. En el caso de los anemómetros magnéticos, este giro activa un diminuto generador eléctrico para dar una medida mucho más precisa.

- Anemómetro de compresión: se basa en el tubo de Pitot y está formado por dos pequeños tubos. Uno de ellos cuenta con un orificio frontal (que mide la presión dinámica) y otro lateral (que mide la presión estática). El otro tubo sólo cuenta con un orificio lateral. La diferencia entre las presiones medidas permite determinar la velocidad del viento.

En el caso de los aerogeneradores de baja potencia, los anemómetros suelen ser montados sobre éstos para determinar si sopla el viento suficiente como para poner el aerogenerador en marcha. Por ello, dichos anemómetros no necesitan tener una gran precisión y suelen resultar bastante baratos. Sin embargo, en lo que a la industria eólica se refiere, sí son necesarios anemómetros mucho más precisos y bien calibrados. Por lo que éstos ya no resultan tan baratos. (Villarrubia, 2004)

Figura 8. Ejemplo de Anemómetro de rotación. (DIRECT INDUSTRY, s.f.)

Medida de la dirección

Veleta

Para la medición de la dirección del viento se utiliza la veleta, la cual suele colocarse próxima al anemómetro, todo en la misma torre. Como ocurría con la velocidad,

la dirección sufre muchas fluctuaciones, por lo que el sistema tiene que ser capaz de determinar una dirección media. Para ello, suelen hacerse lo mismo que en el caso de la velocidad, se promedian valores instantáneos de dirección de la velocidad que se toman aproximadamente cada 10 minutos. (Villarrubia, 2004)

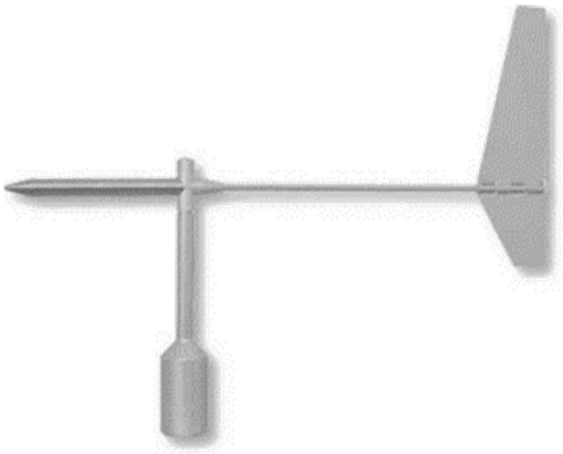

Figura 9. Ejemplo de Veleta. (Moreno Figueredo, s.f.)

Obtención de Datos

Atlas Eólico de Ecuador

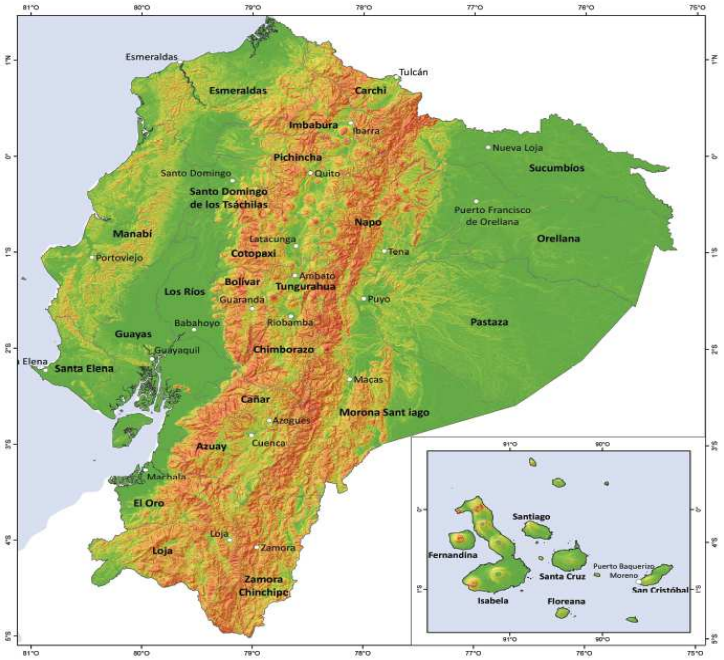

Figura 10. Velocidad del Viento en Ecuador según atlas eólico. (MEER, 2016)

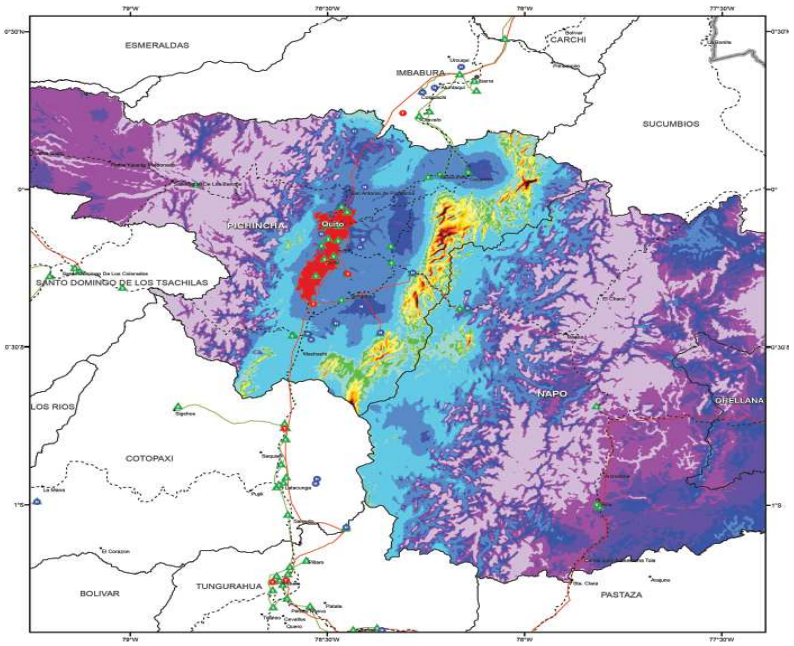

Figura 11. Velocidad del viento en provincia de Pichincha según atlas eólico. (MEER, 2016)

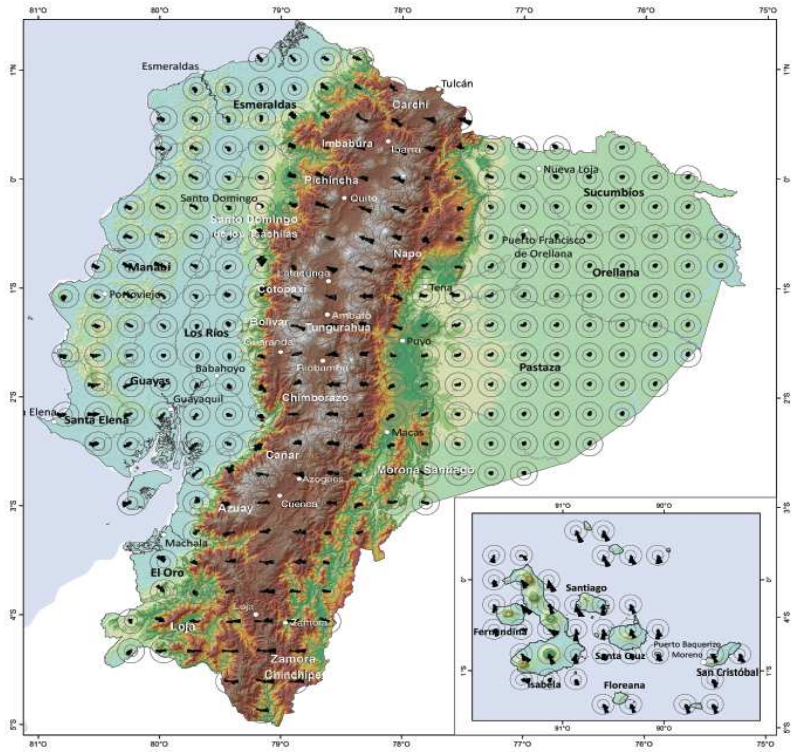

Figura 12. Dirección del viento en Ecuador según atlas eólico. (MEER, 2016)

Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura

La velocidad del viento varía con la altura debido principalmente a las turbulencias, tanto de origen mecánico (causadas por las irregularidades de la superficie del terreno), como de origen térmico (causadas por el gradiente de temperatura del aire que provoca corrientes convectivas en sentido vertical). Como en general la influencia del gradiente de temperatura del aire en una diferencia de altura de 100 metros (diferencia de altura razonable en el caso de los aerogeneradores de gran potencia) es pequeña no se tendrán en cuenta los efectos de las turbulencias térmicas, y solamente se tendrán en cuenta los efectos de las irregularidades de la superficie del terreno. Conforme se separa del terreno, los efectos de rozamiento disminuyen y por lo tanto, la velocidad del viento aumenta. Así, se tiene un gradiente o variación de la velocidad con la altura, y se habla del perfil vertical de la velocidad del viento. La variación de la velocidad del viento con la altura depende de la rugosidad que tenga el terreno. Así, si se tienen superficies lisas (con agua, terrenos llanos, llanuras nevadas,…), el gradiente de velocidad es suave. Sin embargo, si se tienen superficies con gran rugosidad (terrenos con edificaciones urbanas, superficies boscosas,…) el gradiente de velocidad será mayor. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)

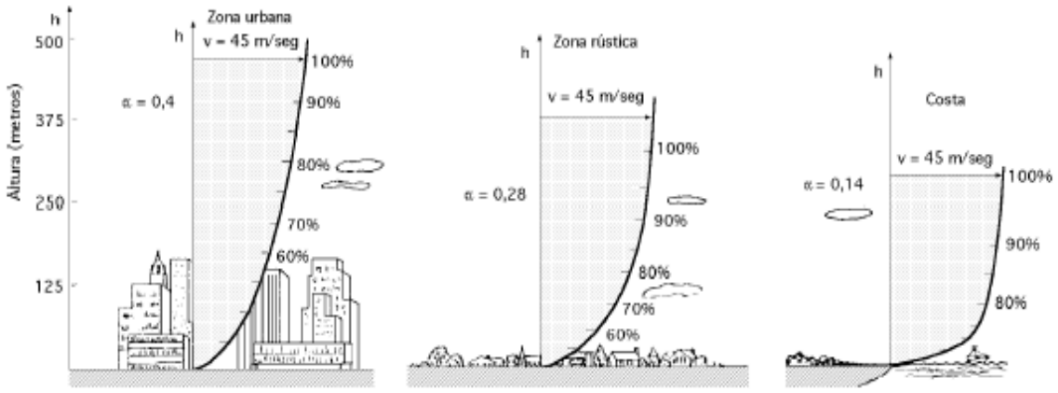

Figura 13. Perfil vertical de la velocidad del viento. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)

Rendimiento aerodinámico

Con la tecnología que tienen grandes países actualmente se ha podido medir el rendimiento que tienen algunos rotores en túneles de viento.

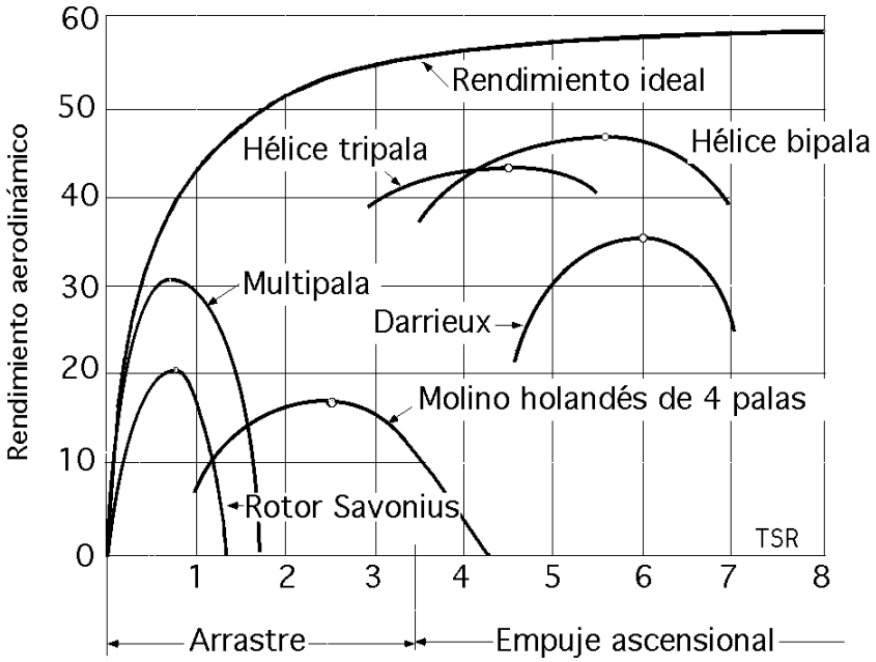

Figura 14. Rendimiento aerodinámico según tipo de aerogenerador y número de palas. (Canalejo Sánchez & Font, 2011)

En la figura 14 se puede observar que el rendimiento aerodinámico de los rotores Savonius es bajo, siendo este un 20% apenas, siendo uno de los rotores de arrastre de menor eficiencia, esto se debe a la sobre presión que se genera en el eje del rotor.

Distribución de Weibull1

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

La variación del viento suele describirse utilizando la llamada Distribución de Weibull. Básicamente se trata de una distribución biparamétrica que define las características propias de un sitio de emplazamiento. (Orduz Berdugo & Suárez Pérez, 2011)

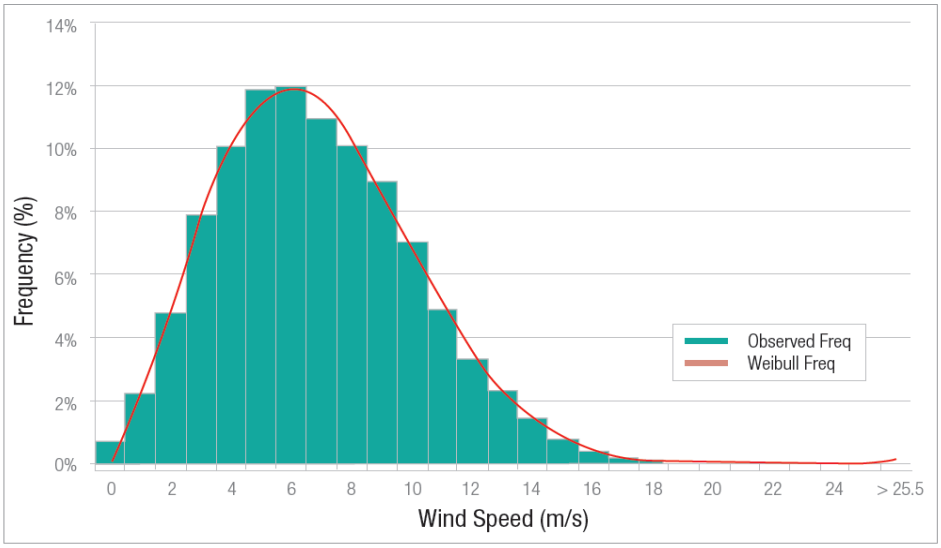

Figura 15. Ejemplo de Distribución de Weibull. (MEER, 2016)

Como se puede observar, la distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces se presentarán velocidades de viento altas, pero se presentan con menor frecuencia. Por otro lado, las velocidades del viento cercanas a 6 m/s presentan mayor ocurrencia. Si se multiplica cada intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y se suman todos, se obtendrá el valor de la velocidad del viento media. (Orduz Berdugo & Suárez Pérez, 2011)

Aerogeneradores de eje vertical

Las turbinas eólicas o aerogeneradores de eje vertical, son aquellas en las que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. Tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento. Trabajan, ya sea por la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la sección expuesta al viento, o por la fuerza de sustentación que experimentan los perfiles aerodinámicos de que están hechos los álabes, al interactuar con la corriente de aire. La diferencia de fuerzas en direcciones relativamente opuestas hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje en una dirección específica. (Orduz Berdugo & Suárez Pérez, 2011)

Figura 16. Ejemplos de aerogeneradores de eje vertical. (Monografías, 2010)

Uno de los principales componentes de una turbina eólica es el rotor, pues es el encargado de realizar la conversión primaria de la energía cinética de una corriente de viento, en energía mecánica rotacional en el eje del aparato. Recientemente se han desarrollado diversas adaptaciones, sin embargo los dos diseños básicos de rotores de eje vertical, son: el diseño Savonius y el Darrieus. (Orduz Berdugo & Suárez Pérez, 2011)

Tabla 2

Características de rotores típicos. (Canalejo Sánchez & Font, 2011)

Características de diferentes tipos de rotores							
Rotor	Eje	Fuerza	Velocidad	Par	Rendimiento	Producción	Costo
Tripala	Horizontal	Sustentación	Alta	Bajo	0.45	Difícil	Alto
Darrieus	Vertical	Sustentación	Alta	Alto	0.35	Difícil	Alto
Multipala	Horizontal	Arrastre	Baja	Alto	0.3	Fácil	Medio
Savonius	**Vertical**	**Arrastre**	**Baja**	**Alto**	**0.2**	**Fácil**	**Bajo**

Rotor Darrieus

Este modelo es el más popular de los aerogeneradores de eje vertical. Es creado para evitar la construcción de hélices sofisticadas como las usadas en los aerogeneradores de eje horizontal. Permite mayores velocidades que las del rotor Savonius.

Consta de unas finas palas con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje solo por los dos extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje, al poseer una forma parecida a una cuerda para saltar, hace que los alerones experimenten una fuerte fuerza centrífuga.

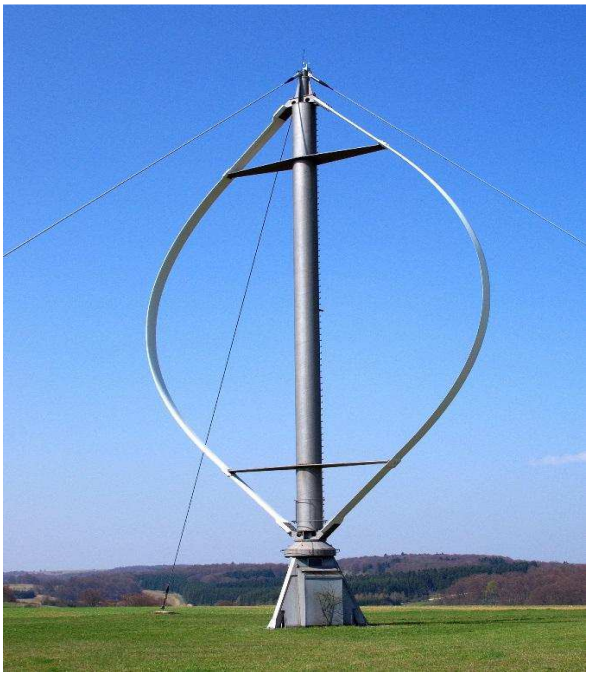

Figura 17. Rotor Darrieus. (Verde Zona, 2015)

Este tipo de rotor no puede arrancar por sí mismo, se debe usar un sistema de arranque secundario, pero una vez en marcha es capaz de mantenerse gracias a la aerodinámica de sus palas. (Antezana Núñez, 2004)

Rotor Savonius

El modelo del rotor Savonius es el más simple. Consiste en un cilindro hueco partido por la mitad, en el cual sus dos mitades han sido desplazadas para convertirlas en una S; las partes cóncavas de la S captan el viento, mientras que los reversos presentan una menor resistencia al viento, por lo que girarán en el sentido que menos resistencia ofrezcan. Este sistema tiene el inconveniente de presentar una sobre presión en el interior de las zonas cóncavas al no poder salir el aire, perjudicando el rendimiento; el sistema queda mejorado separando ambas palas y dejando un hueco entre ambas para que exista un flujo de aire.

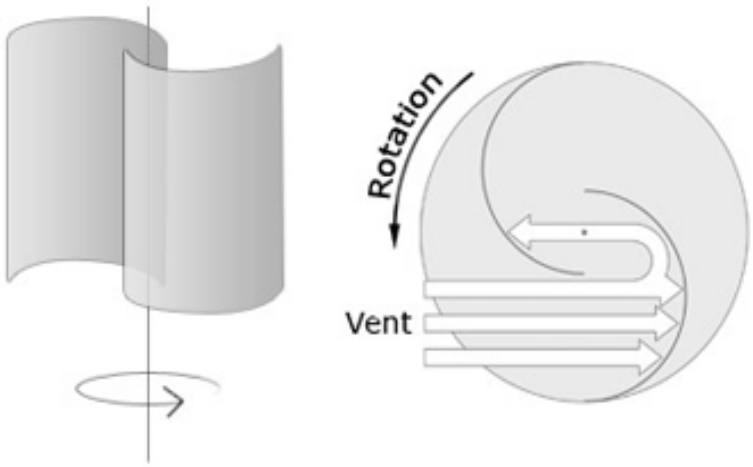

Figura 18. Rotor Savonius. (Ingeni-Arte, s.f.)

Debido a la resistencia al aire de este tipo de rotor, solo puede ser utilizado a bajas velocidades. Las mejores aplicaciones para este tipo de rotor son de tipo mecánico, como el bombeo de agua. (Antezana Núñez, 2004)

Método

El proyecto consiste en la construcción de un generador eólico de eje vertical, el cual será conectado a un Encoder Arduino, este dispositivo enviará información a una tarjeta micro SD por medio de un microcontrolador. La información de la tarjeta SD se podrá visualizar desde una computadora.

Diseño Mecánico

Para la construcción de las aspas y de la estructura se utilizó el software de diseño llamado Autodesk Inventor 2017 con licencia de estudiante, en este software se realizó el diseño en 3D y se realizó la simulación sometiéndolo a fuerzas que van a intervenir en la maqueta como: fuerza del viento, la gravedad y el peso.

Para iniciar la construcción de este aerogenerador, se tomó los datos para el diseño del generador, tales como: velocidad y dirección del viento, estos datos se obtuvieron del anemómetro ubicado en la Universidad SEK campus Carcelén.

Tabla 3

Datos anemómetro Universidad SEK

Datos estación meteorológica Universidad SEK				
Año	Mes	Promedio (m/s)	Vel. más alta (m/s)	Dirección
	JUN	0.4	8	OSO
	JUL	0.4	8.5	SO
	AGO	**0.5**	**8.9**	**NNO**
2015	**SEP**	**0.5**	**12.1**	**OSO**
	OCT	0.4	9.8	ESE
	NOV	0.4	10.3	NE
	DIC	0.4	10.7	NE
	ENE	0.4	7.6	ESE
	FEB	0.4	8.5	OSO
2016	MAR	0.4	7.2	OSO
	ABR	0.4	8.9	OSO
	MAY	0.4	8	OSO

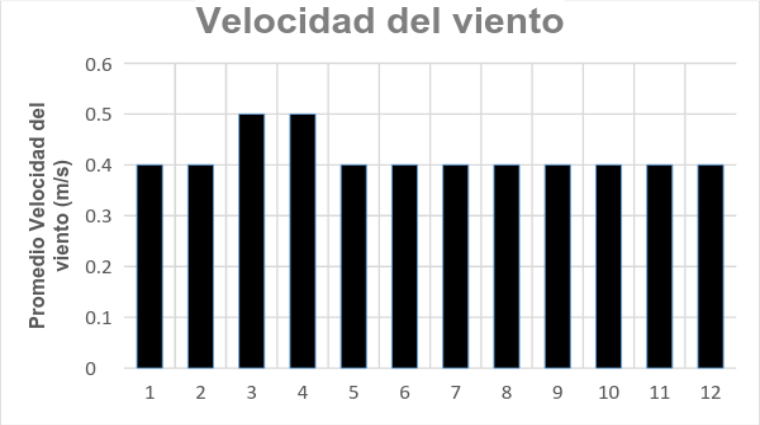

Figura 19. Datos anemómetro Universidad SEK.

Debido a que la ubicación del anemómetro no es la más adecuada, se tomó la información de velocidad del viento de la base de datos Atmosfheric Science Data Center.

En este programa se ingresaron datos como latitud, longitud, tipo de geografía del lugar y tamaño aproximado de vegetación.

Los datos que se obtuvieron a partir de esta base fueron:

Tabla 4

Datos obtenidos de Atmosfheric Science Data Center. (Atmosfheric Science Data Center, 2016)

Datos meteorológicos Atmosfheric Science Data Center	
Mes	Velocidad (m/s)
Enero	1.66
Febrero	1.47
Marzo	1.45
Abril	1.52
Mayo	1.7
Junio	**2.13**
Julio	**2.28**
Agosto	**2.27**
Septiembre	**2.06**
Octubre	1.93
Noviembre	1.89
Diciembre	1.84
Promedio Anual	1.85

Haciendo referencia a los datos obtenidos, tanto en el software como en el anemómetro, coincide que en los meses de: julio, agosto y septiembre, se obtienen los promedios de velocidad más altos, por tanto la eficiencia en esos periodos de tiempo aumentará.

Por otro lado se observa que en los datos obtenidos del anemómetro, hay un parámetro a utilizar en el momento de diseñar y elegir los materiales para construcción, el mismo se refiere a la velocidad máxima.

Tomamos el dato de velocidad del viento con el anemómetro ubicado en la garita de la Universidad Internacional SEK, para diseño del aerogenerador se tomó la velocidad máxima del año.

$$Vmax = 12.1 \frac{m}{s}$$

La siguiente ecuación fue tomada de NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción), que se la puede descargar de la página web del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, esta ecuación sirve para calcular la velocidad corregida del viento, esta dependerá del factor corregido del viento, que hace referencia a altura de vegetación o edificación cercana al lugar donde será instalada la maqueta.

Vb: velocidad corregida del viento

Vmax: velocidad máxima

σ: $factor\ corregido\ del\ viento$

$$Vb = Vmax\ \sigma \qquad [1]$$

$$Vb = 12.1\ \frac{m}{s} * 0.91$$

$$Vb = 11.01\ \frac{m}{s}$$

La siguiente ecuación también fue tomada del NEC, sirve para calcular la presión que ejercerá el viento en cualquier estructura.

P: $presión$

δ: $densidad$

$$P = \frac{1}{2} * \delta * Vb^2 * Ce * Cf \quad [2]$$

$$P = \frac{1}{2} * 1.25 \frac{kg}{m^3} * \left(11.01 \frac{m}{s}\right)^2 * 0.8 * 1.5$$

$$P = 90932\ Pa$$

Para poder saber la presión que ejercerá el viento en una estructura, debemos calcular el área de la misma.

A: $área$

b: $base$

h: $altura$

$$A = (b1 * h1) \quad [3]$$

$$A = 0.209\ m^2$$

Con los datos de presión y área aplicamos la fórmula de fuerza.

F: fuerza

$$F = P * A \quad [4]$$

$$F = 90932Pa * 0.0209m^2$$

$$F = 19007N$$

Aspas

Una de las características principales de los rotores tipo Savonius, es el diseño de sus aspas, formando generalmente una ”S”, estas pueden estar unidas en el centro o tener un leve desfase.

Para este diseño se tomó en consideración la “S” que está unida en el centro, ya que aprovecha en su totalidad el recurso eólico.

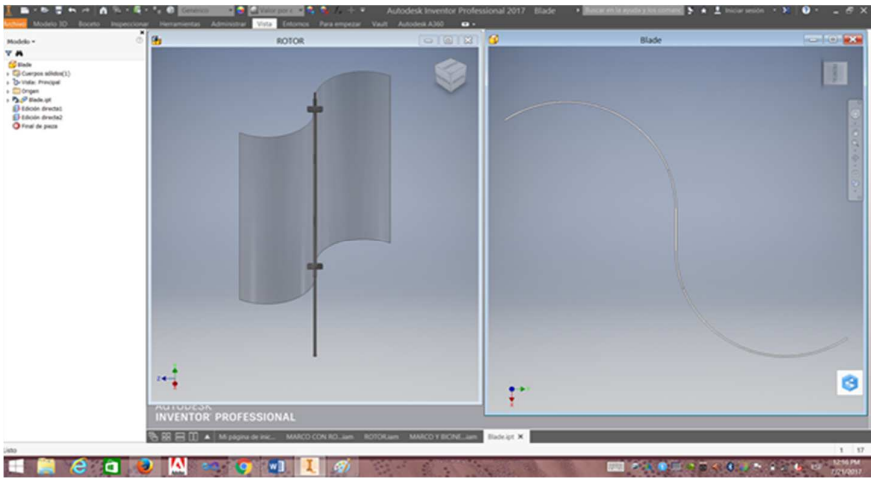

Figura 20. Diseño de Aspas.

En vista de que la velocidad máxima del viento en todo el año fue de 12.1 m/s, se seleccionó que el material para la construcción de las aspas sea el Poli-metilmetacrilato, más comúnmente conocido como vidrio acrílico, el espesor del material es de 2 mm que es lo más delgado que se puede conseguir en el mercado, las ventajas de este material son la resistencia a las cambios ambientales de temperatura, su peso es bajo, y sobre todo que al ser un plástico se presta para el termo conformado.

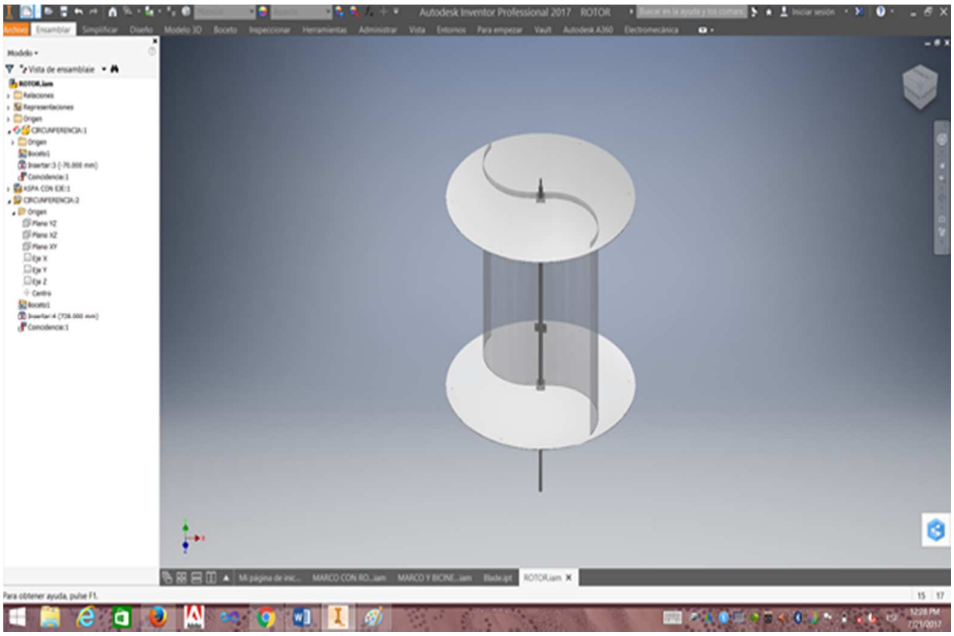

Figura 21. Diseño de Rotor.

Se realizaron los cálculos de fuerza del viento y se analizó la fluencia de materiales según Von Mises. Se realizó el análisis en resistencia y en falla.

Análisis de Resistencia

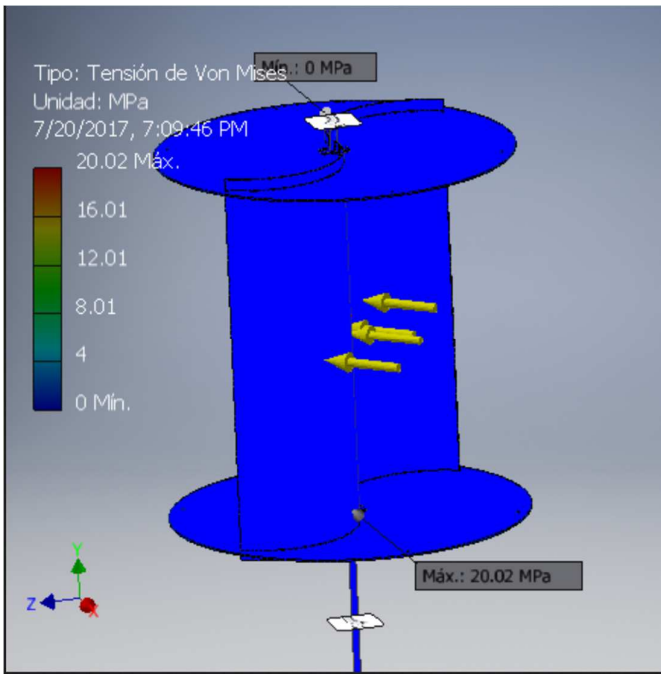

Figura 22. Análisis de resistencia según Von Mises.

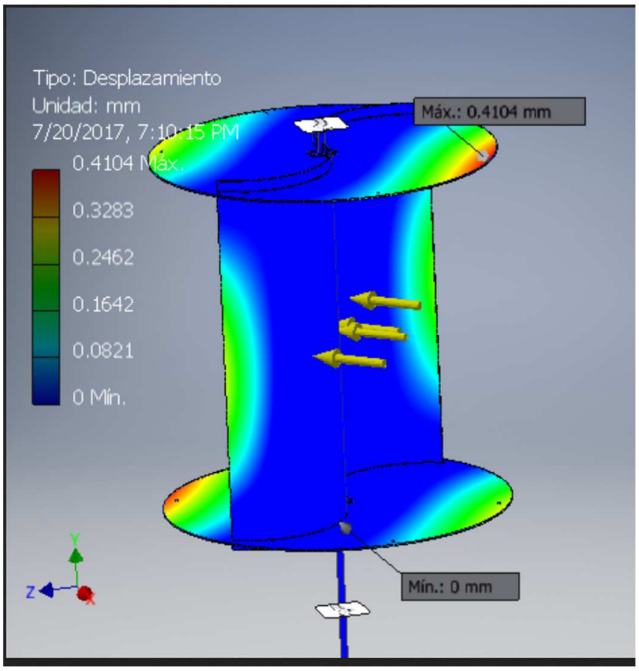

Figura 23. Análisis de desplazamiento de resistencia.

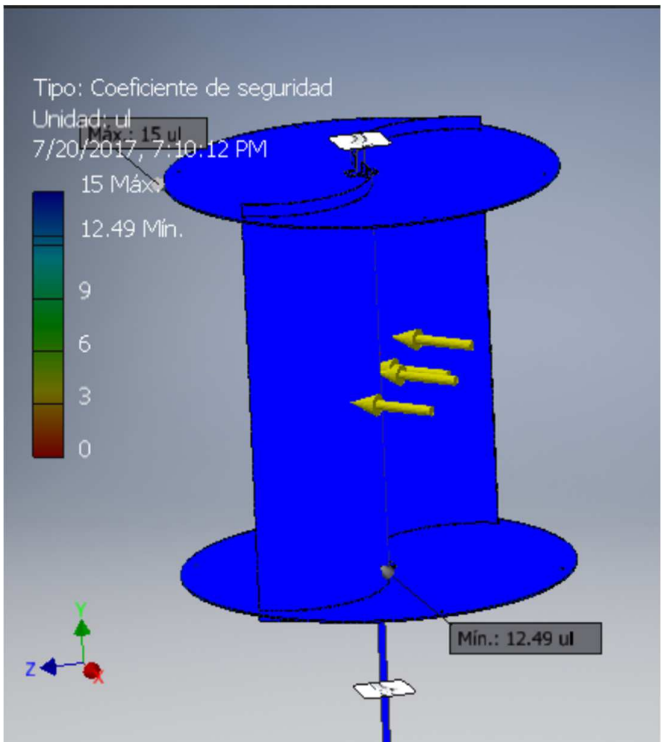

Figura 24. Factor de Seguridad.

Tabla 5

Análisis de resistencia según Von Misses

Análisis de resistencia				
Tensión de Von Misses				
Velocidad del viento (m/s)	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo de Von Misses (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad
12.1	19.005	20.02	0.4104	12.49

La tabla número 5 explica un resumen acerca del análisis de resistencia, se calculó la fuerza del viento con el valor de la velocidad máxima del año, esta fue de 12.1 m/s, con estos datos hallamos la tensión de Von Misses, la simulación también da un dato como el valor del desplazamiento que equivales a 0.4 mm.

Finalmente se calculó el factor de seguridad, nos da un valor de 12.49, esto se debe a que el espesor de la lámina de acrílico es muy gruesa, de 2mm, se debió escoger una más delgada pero en el mercado nacional es lo más delgado que se puede conseguir.

Análisis de Falla

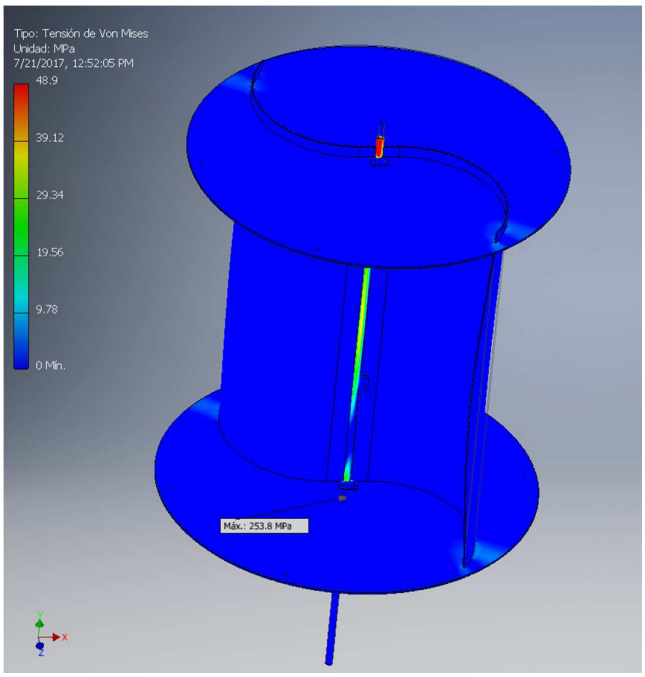

Figura 25. Análisis de falla.

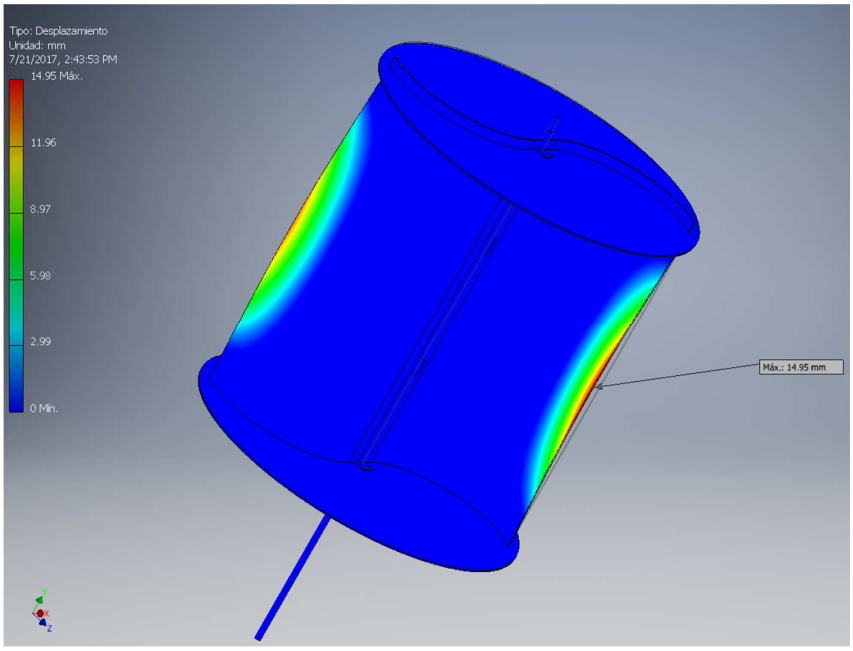

Figura 26. Análisis de desplazamiento de falla.

Tabla 6

Análisis de falla según Von Misses

Análisis de falla				
Tensión de Von Misses				
Velocidad del viento (m/s)	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo de Von Misses (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad
84.153	919.239	253.8	14.95	1

La tabla número 6 nos explica el análisis de falla del rotor, para calcular la fuerza y velocidad del viento a la que va a fallar el rotor se tiene que igualar el coeficiente de seguridad a cero.

Al realizar los cálculos se analizó que la falla se va a dar en el eje del rotor, ya que al momento de la tensión se va a doblar, el máximo desplazamiento se va a dar en las láminas de acrílico, logrando un desplazamiento hasta de casi 15 mm.

La velocidad del viento que se calculó es de 84.153 m/s, es una velocidad de viento muy alta para la zona, con este valor concluimos que el rotor no tendrá problemas de diseño.

Termo conformado de aspas

Para el termo conformado del acrílico primero se cortó el material con esmeriladora y disco de corte, luego se construyó una plantilla de acero, y el acrílico se lo alojó dentro de la plantilla sujeta con pinzas de presión.

Se le aplicó temperatura durante 30 minutos con una lámpara de calor a 120 °C, este proceso se lo repitió por tres veces, recién ahí el material toma la forma de la plantilla, es muy importante controlar la temperatura ya que el material puede fundirse.

Figura 27. Termo conformado de las aspas.

Después de aplicar el calor, se dejó enfriar lentamente el acrílico, y se repitió el proceso por tres veces seguidas.

Estructura

Al momento de diseñar la estructura se consideraron los siguientes parámetros:

- Poco peso.
- El tamaño sea manejable.
- Materiales disponibles en el mercado nacional.

Primero se construyó el marco, con tubo cuadrado de 30 mm, luego se perforó y se soldó bocines donde irán alojados los rodamientos en donde asentará el eje central de la maqueta, los bocines fueron maquinados en torno según los requerimientos, y los rodamientos fueron escogidos en la marca FAG, son dos de diferente medidas, el primero para la parte superior de características más sensibles, y el segundo alojado en la parte inferior del aspa más grande, ya que este soportará todo el peso de las aspas y el movimiento de las mismas. Estos rodamientos se usan normalmente en herramientas de corte como esmeriladoras o rectificadoras, son sometidos a tensiones medias y resisten altas revoluciones.

De igual manera el diseño fue sometido a análisis de tensiones según Von Mises, tanto de resistencia como de falla de la estructura.

Análisis de Resistencia

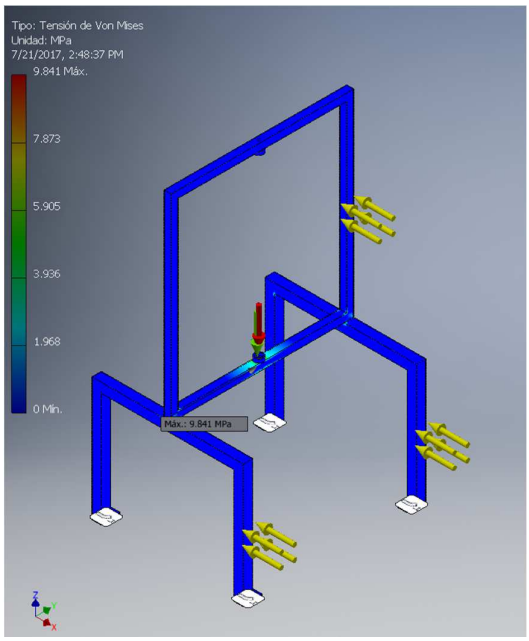

Figura 28. Análisis de resistencia según Von Mises.

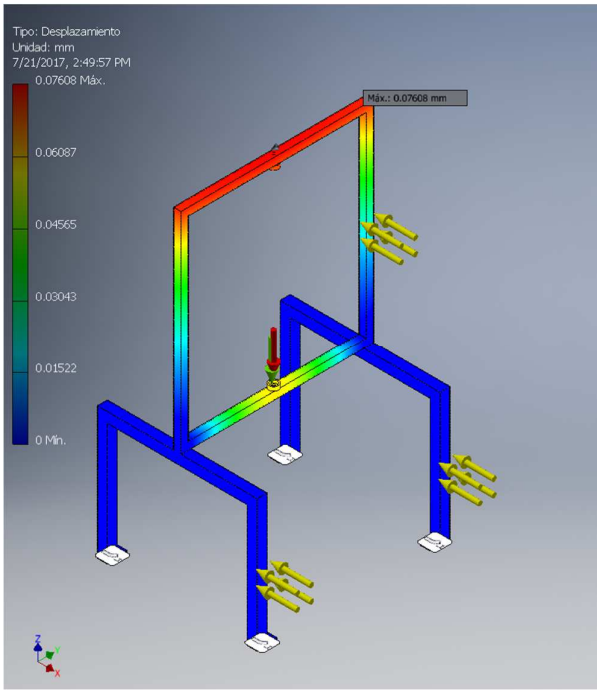

Figura 29. Análisis de desplazamiento de resistencia.

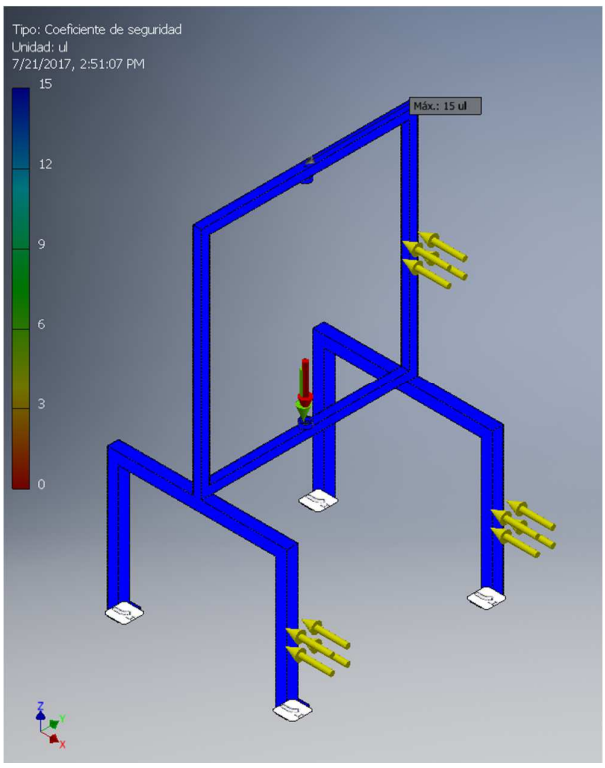

Figura 30. Análisis de Factor de seguridad.

Tabla 7

Análisis de resistencia según Von Misses

Análisis de resistencia				
Tensión de Von Misses				
Velocidad del viento (m/s)	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo de Von Misses (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad
12.1	74.281	9.841	0.07608	15

En la tabla 7 se realizó un resumen del análisis de resistencia de la estructura, se llegó a conocer que la estructura no tendrá problemas con el esfuerzo al que será sometida.

Se calculó el factor de seguridad con un valor de 15, esto se debe a que el tubo cuadrado que se escogió tiene un espesor de 1.5 mm, se debió escoger un espesor menor pero los lados del tubo cuadrado eran muy bajos, el tubo de espesor 1.5mm es a partir de 25 mm, por tal razón se escogió uno de 30mm, aparte la diferencia en el costo no es significativo.

Análisis de Falla

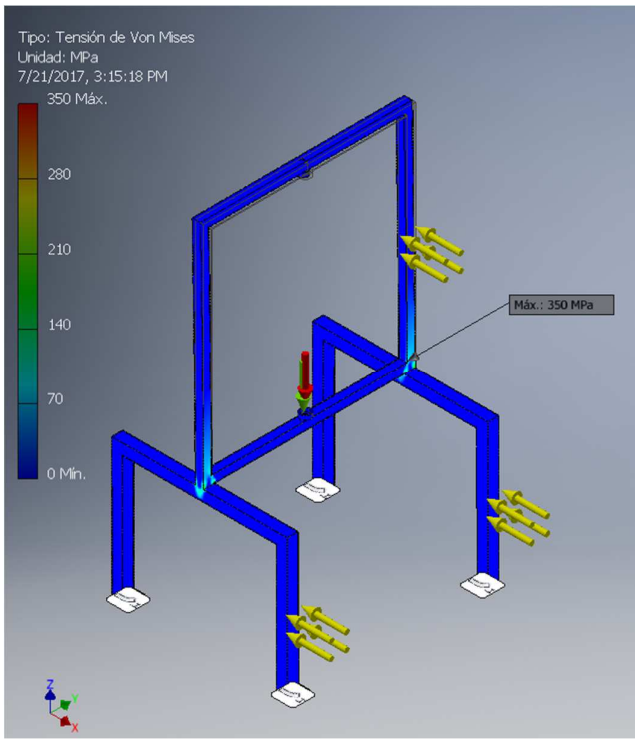

Figura 31. Análisis de falla.

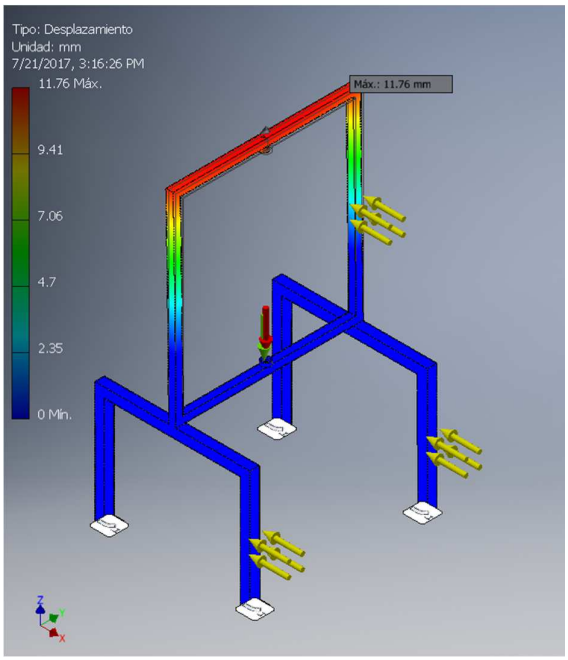

Figura 32. Análisis de desplazamiento de falla.

Tabla 8

Análisis de falla según Von Misses

Análisis de falla				
Tensión de Von Misses				
Velocidad del viento (m/s)	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo de Von Misses (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad
151.85	1918.95	350	11.76	1

La tabla número 8 habla acerca del análisis de falla de la estructura, para calcular la fuerza y velocidad del viento a la que va a fallar l estructura se tiene que igualar el coeficiente de seguridad a cero.

Al realizar los cálculos se analizó que la falla se va a dar en la unión del marco del rotor con la base, ya que al momento de la tensión se va a doblar, el máximo desplazamiento se va a dar es de 11.76mm.

La velocidad del viento que se calculó es de 151.85 m/s, es una velocidad de viento muy alta para la zona, con este valor concluimos que el rotor no tendrá problemas de diseño.

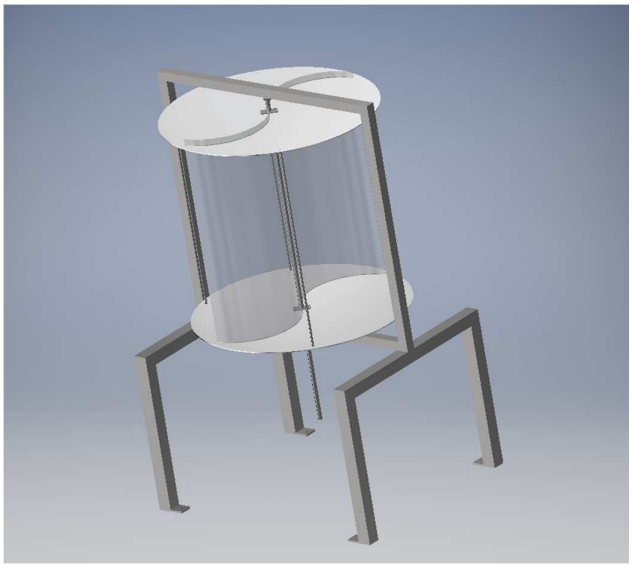

Figura 33. Diseño de Estructura.

Después se dió el fondo de pintura anticorrosiva y el acabado final.

Figura 34. Marco de aerogenerador tipo Savonius.

Luego se instaló el eje central del rotor, y se unió a las aspas por medio de tornillos, la ubicación del eje debe ser muy precisa ya que es determinante para romper la inercia al inicio del giro.

Por último se instaló la base del marco, fabricado con tubo cuadrado de 40 mm.

Figura 35. Aerogenerador con eje y aspas instaladas.

Diseño eléctrico

Primero se conectó mediante un bushing maquinado en torno y con prisioneros, un módulo Encoder modelo KY-040 para Arduino con el eje de salida de la maqueta, este Encoder se lo conectó a un microcontrolador marca Arduino y modelo Uno para poder energizarlo.

El Encoder KY-040 necesita de 4 conexiones eléctricas, estas son: 5 voltios, conexión a tierra, y dos salidas digitales.

También a este microcontrolador se le conectó un módulo micro SD Card, este necesita de 6 conexiones eléctricas que son: 5 voltios, conexión a tierra, y cuatro salidas digitales.

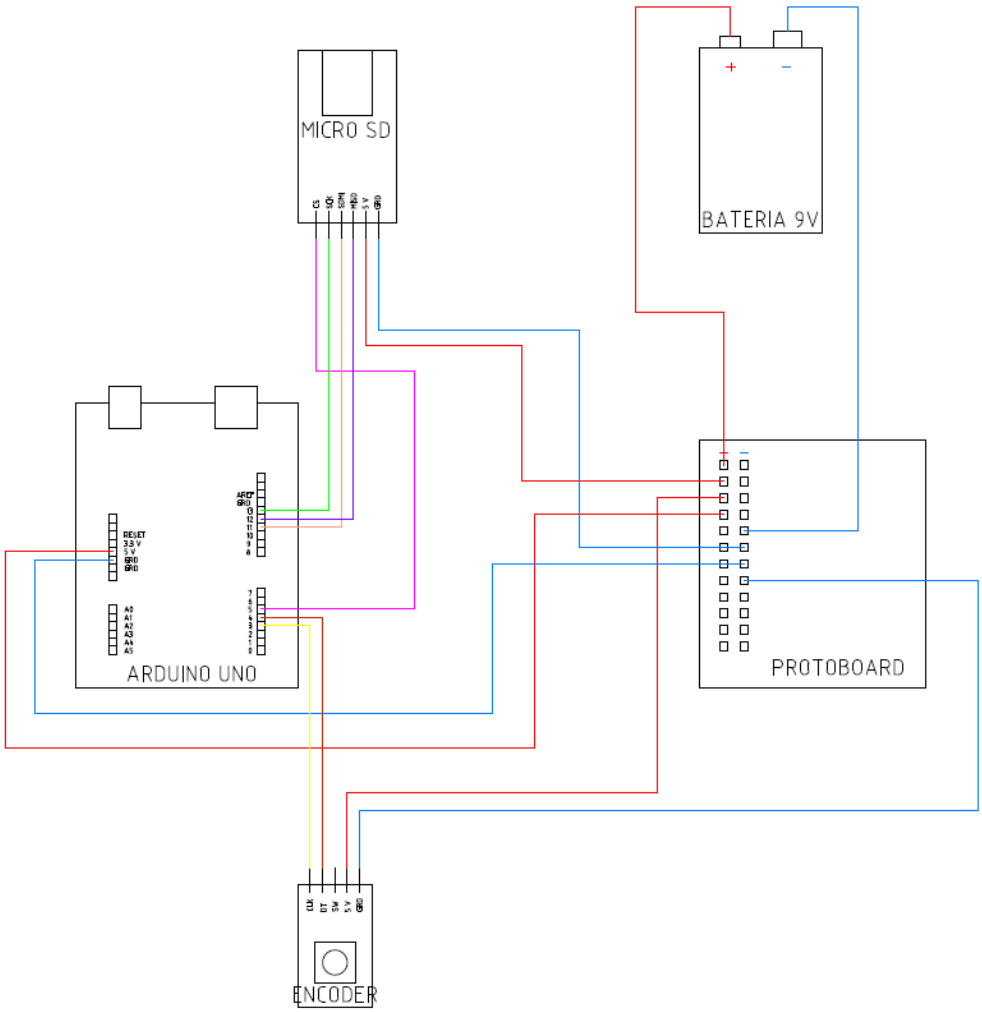

Figura 36. Diagrama eléctrico.

Diseño Software

Hardware y Software

El software se desarrolló utilizando Arduino 1.8.3, este es un software libre que se lo puede descargar de internet y de forma gratuita.

Arduino

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Las tarjetas Arduino son capaces de leer entradas - luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter - y convertirlo en una salida - activar un motor, encender un LED, publicar algo en línea. Usted puede decirle a su junta lo que debe hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador en el tablero. Para ello se utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en el cableado) y el software Arduino (IDE), basado en el procesamiento. (Arduino.cc, 2017)

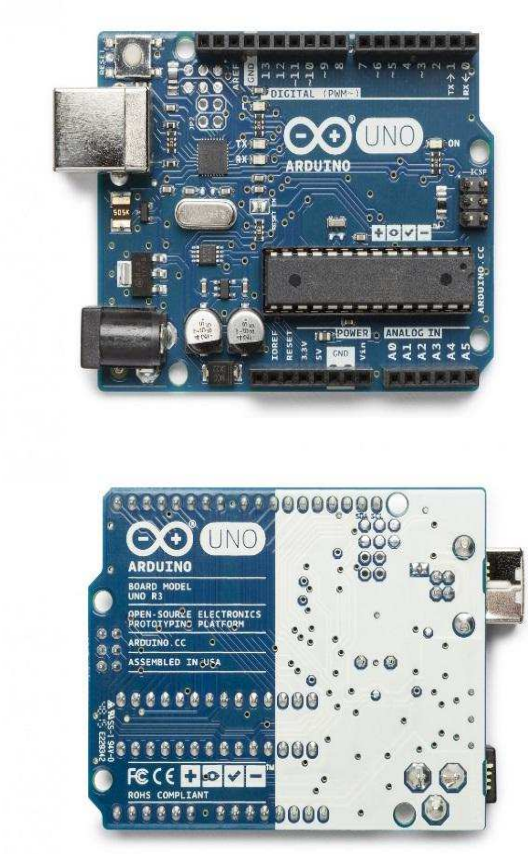

Figura 37. Frontal y reverso de placa de Arduino Uno. (Arduino.cc, 2017)

Tabla 9

Especificaciones Técnicas Arduino Uno. (Arduino.cc, 2017)

Especificaciones Técnicas Arduino Uno	
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
I/O Pins Digitales	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Pins Entradas Analógicas	6
Corriente DC por I/O Pin	20 mA
Corriente DC para 3.3V Pin	50 mA
Clock Speed	16 MHz

En la siguiente ilustración se ubican los elementos más importantes que componen la placa Arduino Uno, estos serán descritos de arriba abajo y de izquierda a derecha:

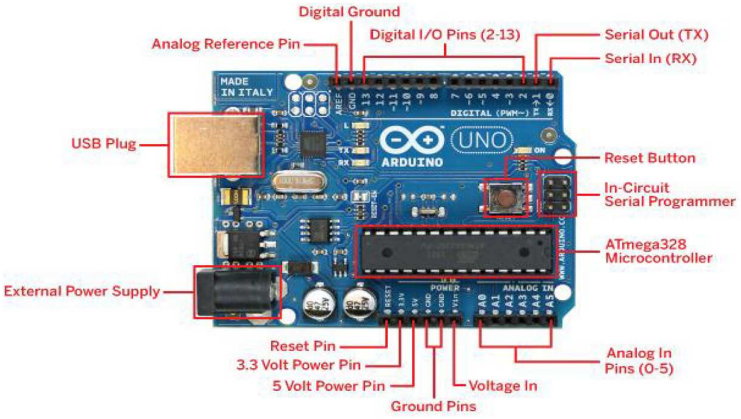

Figura 38. Elementos de placa Arduino Uno. (Lledó Sánchez, 2012)

Referencia para pines analógicos (AREF)

Tensión de referencia para entradas analógicas. Se utiliza con la función analogReference().

Pines de tierra (GND)

Masa del circuito para pines, es decir es la tensión de referencia de 0V.

Pines digitales de entrada y salida

Desde ellos se podrá leer la información del sensor o activar el actuador. Operan a 5 voltios. Cada pin proporciona o recibe como máximo 40mA.

Conector USB

Existen varios tipos de conectores USB, en concreto esta placa utiliza el tipo B hembra. Con lo cual se necesitará un cable tipo B macho. La placa se puede alimentar con la tensión de 5V que le proporciona el bus serie USB.

Botón Reset

Utilizando este botón se podrá reiniciar la ejecución del código del microcontrolador.

ICSP (In Circuit Serial Programming)

Es un conector utilizado en los dispositivos PIC para programarlos sin necesidad de tener que retirar el chip del circuito del que forma parte.

Microcontrolador ATmega328

El microcontrolador es el elemento más importante de la placa. Es donde se instalará y ejecutará el código que se haya diseñado. Ha sido creado por la compañía Atmel, tiene un voltaje operativo de 5V, con un límite de 20V.

Fuente de alimentación externa

La placa puede ser alimentada también mediante corriente continua suministrada por el conector jack de 3.5mm que podrá recibir entre 7 y 12V.

Pin de Reset

Se puede imitar el funcionamiento del botón reset suministrando un valor LOW (0V) para reiniciar el microcontrolador.

Pin de 3.3V

Desde aquí se puede suministrar 3.3V a los dispositivos que lo necesiten con una corriente máxima de 50mA. Es generada gracias al chip FTDI integrado en la placa.

Pin de 5V

Este pin saca una tensión de 5v del regulador de la placa. El regulador es necesario puesto que puede ser alimentada con distintos voltajes. Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino

Pin de Vin

Es el voltaje de entrada cuando se usa una fuente de alimentación externa (no tiene en cuenta la conexión USB). Se puede proporcionar voltaje a la placa a través de este pin, o en caso de que se esté utilizando una fuente de alimentación externa tomar el valor que está siendo suministrado.

Pines analógicos

Esta placa contiene 6 pines de entrada analógicos. Los elementos que se conecten aquí suelen tener mayor precisión que los digitales pero su uso requiere de una lógica levemente mayor. Más adelante se comentará el uso de un termistor analógico. (Lledó Sánchez, 2012)

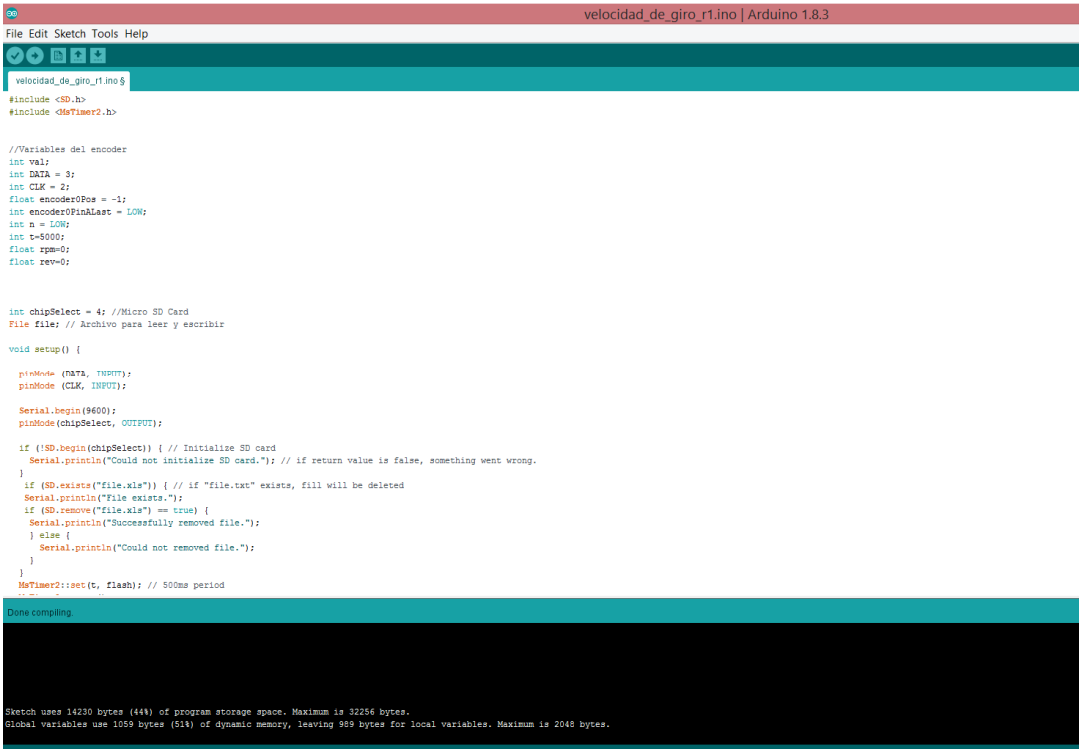

Figura 39. Programa en software Arduino 1.8.3.

Diagrama de Flujo

Una manera de entender mejor el programa es hacer el diagrama de flujo, específicamente para este programa son dos diagramas de flujo debido a que uno es el programa en sí y el otro es una función a la que se le llama cada 5 segundos.

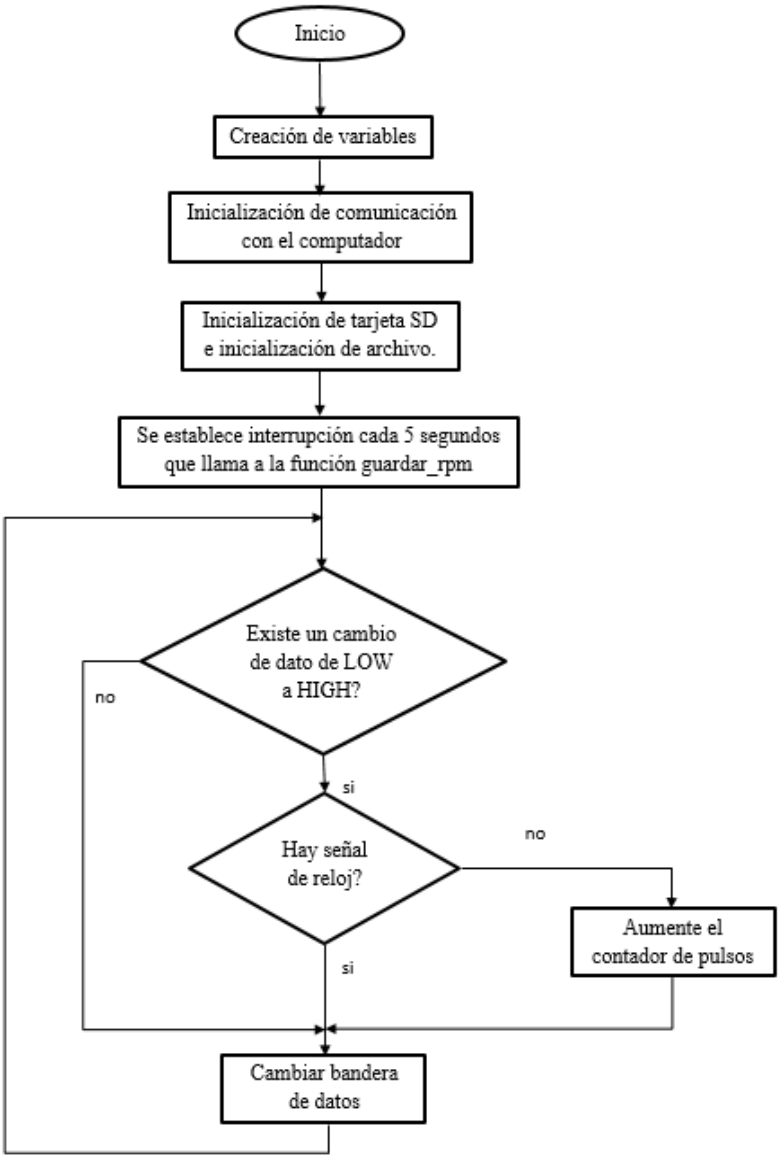

Figura 40. Diagrama de Flujo programa.

El primer diagrama de flujo nos explica que inicialmente se crean y se dan valores a las variables tanto int como float, se inicia la comunicación del microcontrolador con la computadora y se detecta si hay una memoria SD y si se la puede inicializar.

Luego se inicia una interrupción y esta se dará cada 5 segundos, dentro de estos 5 segundos se entrará a un detector de flancos ascendente que es una secuencia, esta se dará repetidamente las veces que sea necesario cada 5 segundos, primero con un if pregunta si existe un cambio de dato de LOW a HIGH, y entra a otra pregunta si hay señal de reloj, mecánicamente significa si el encoder giró y dió una pulsación.

Esto hace que el contador incremente en una unidad, y por último paso dentro de este flanco ascendente es inicializar los datos de LOW y HIGH.

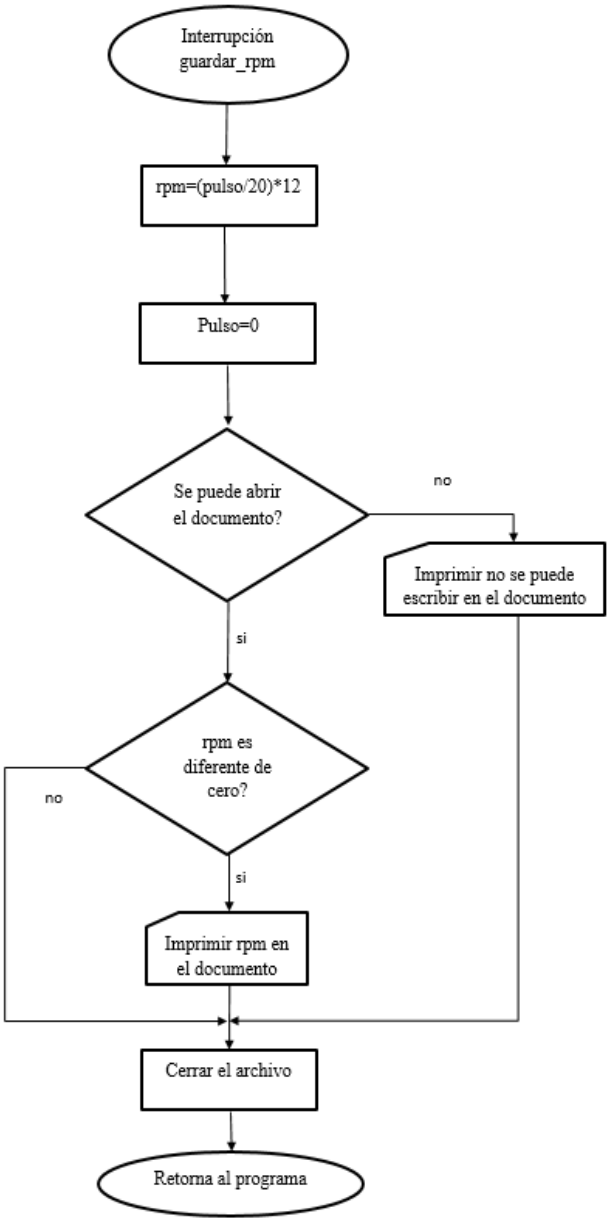

Figura 41. Diagrama de Flujo función guardar_rpm.

El segundo diagrama de flujo se refiere a lo que pasa dentro de la interrupción, describe lo que pasa dentro de los 5 segundos. Primero la variable de número de pulsos la divide por 20 y a ese valor lo multiplica por 12, enseguida de esta operación el número de pulsos toma el valor de cero.

Luego pregunta si el archivo dentro de la tarjeta SD se puede abrir, y después otra pregunta si el valor de rpm es diferente de cero, si el valor difiere imprime el valor en el documento para después cerrar el mismo archivo.

Resultados

Los resultados en cuanto a la mecánica fueron los esperados, la maqueta sería sometida a esfuerzos de gravedad y fuerza del viento, por lo tanto no habría problemas de diseño. Las aspas también funcionaron correctamente.

La maqueta fue instalada en el techo de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería, aproximadamente a unos 5 metros sobre el nivel del suelo. La vegetación en esta zona es alta por lo que influirá en la eficiencia de la maqueta.

Figura 42. Instalación de maqueta.

Figura 43. Maqueta en funcionamiento.

Figura 44. Funcionamiento de maqueta en su ubicación.

Figura 45. Vegetación alta en la proximidad de la maqueta.

Los resultados en la parte eléctrica fueron los esperados, funcionó de manera correcta, fue energizada con batería de 9 voltios.

La caja que contiene las conexiones eléctricas fue diseñada en acero inoxidable, pero debidamente aislada, por lo tanto no ocurrieron problemas eléctricos.

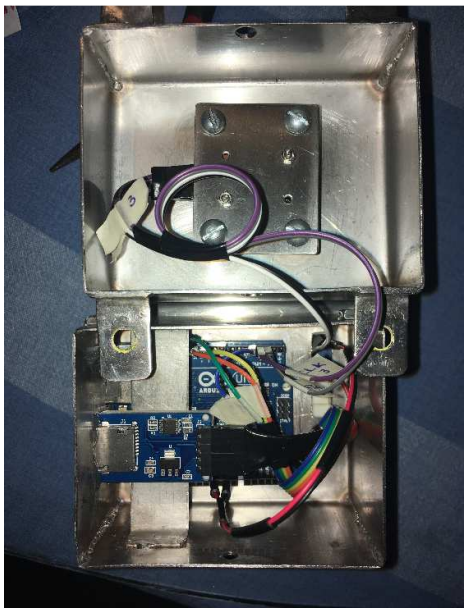

Figura 46. Conexión eléctrica sistema de medición de giro.

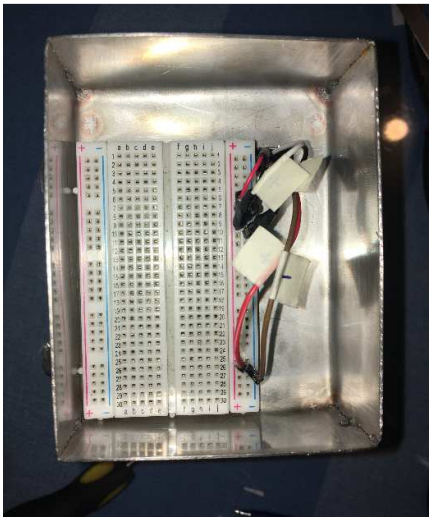

Figura 47. Conexión eléctrica, energización de sistema.

Todo el sistema se energizó mediante una batería de 9 voltios con su respectivo adaptador para conectarse al Arduino.

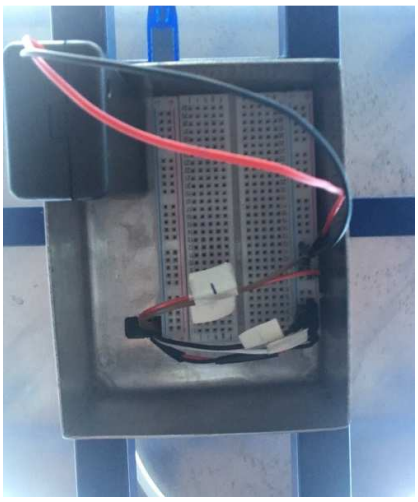

Figura 48. Energización con batería.

En cuanto se refiere a la parte de la programación, también funcionó de manera correcta, el sistema almacena la información dentro de la tarjeta SD, guarda la información en formato de Excel, el programa realiza cálculos cada 5 segundos de las revoluciones por minuto, y guarda la información siempre y cuando los datos difieran de cero.

Los datos que se obtuvieron a partir de la maqueta pueden ser visualizados en cualquier computador.

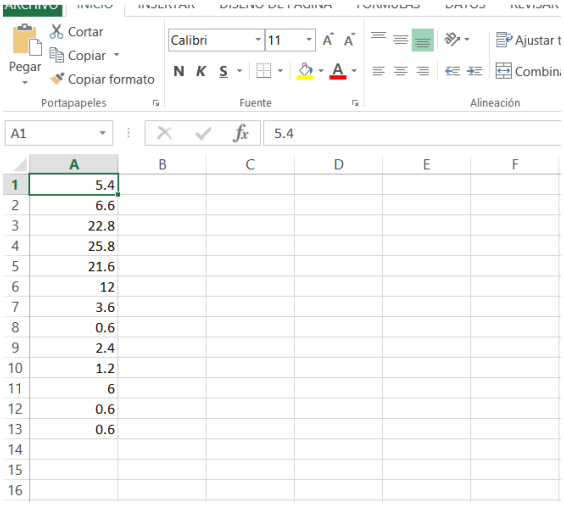

Figura 49. Visualización de datos en formato de Excel.

La figura 47 nos indica la manera en que se visualizan los datos en el computador, mediante un formato de Excel.

Tabla 10

Mediciones tomadas por la maqueta

Reporte de RPM	
Número de medición	Velocidad angular(rpm)
1	40.20
2	72.60
3	**105.60**
4	94.80
5	**121.80**
6	**139.20**
7	**124.80**
8	55.20
9	52.20
10	42.60
11	33.00
12	30.60
13	31.20
14	9.00
15	10.20
16	13.80
17	4.80
18	29.40
19	32.40
20	37.80
21	42.60
22	48.00
23	29.40
24	14.40
25	1.80
26	12.00
27	21.00
28	21.00
29	19.80
30	28.80
31	30.00
32	47.40
33	34.80
34	55.80
35	21.00

La tabla 6 muestra las mediciones de la maqueta, estas fueron tomadas en un periodo de media hora, nos registra valores muy altos así como unos muy bajos, esto se debe que la velocidad del viento varía mucho.

Los datos que entrega la maqueta son alentadores ya que el número de revoluciones por minuto (rpm) es alta para este tipo de aerogeneradores.

Otro resultado importante que se obtuvo es el económico, la construcción de la maqueta tiene un valor aproximado de $320, esto incluyendo materiales mecánicos, eléctricos y procesos de construcción.

Este análisis nos deja un balance positivo, ya que los costos de fabricación son bajos. Esta entre los aerogeneradores de menor costo, es tan bajo que para abaratar mucho más los gastos se lo podría construir con materiales reciclados.

Tabla 11

Costos de materiales de construcción

Materiales de construcción mecánica y eléctrica								
Ítem	Materiales de construcción	Cant.	Costo	Material utilizado	Cant.	Unidad	Precio Unitario	Total
1	Plancha de aluminio 2000 x1000 x2mm	1	$ 28.50	Plancha de aluminio R600 x 2mm	2	Und.	$ 7.10	$ 14.20
2	Plancha de acrílico 1800 x 1200 x 2mm	1	$ 48.52	Plancha de acrílico 700 x 400 x 2mm	2	Und.	$ 6.06	$ 12.12
3	Rodamiento FAG 21 x 8mm	1	$ 4.00	Rodamiento FAG 21 x 8mm	1	Und.	$ 4.00	$ 4.00
4	Rodamiento FAG 26 x 10mm	1	$ 5.50	Rodamiento FAG 26 x 10mm	1	Und.	$ 5.50	$ 5.50
5	Tubing 1/4" OD Swagelok x 6000mm	1	$ 48.00	Tubing 1/4" OD Swagelok L=3000mm	1	Mts.	$ 8.00	$ 24.00
6	Eje 1/2" inox x 6000mm	1	$ 25.00	Eje 1/2" inox L=1000mm	1	Mts.	$ 4.15	$ 12.45
7	Tubo cuadrado 30 x 6000mm	1	$ 8.00	Tubo cuadrado 30mm L=2500mm	1	Mts.	$ 1.30	$ 3.30
8	Tubo cuadrado 40 x 6000mm	1	$ 15.00	Tubo cuadrado 40mm L=3000mm	1	Mts.	$ 2.50	$ 7.50
9	Arduino Uno	1	$ 19.50	Arduino Uno	1	Und.	$ 19.50	$ 19.50
10	Módulo Encoder Arduino	1	$ 4.50	Módulo Encoder Arduino	1	Und.	$ 4.50	$ 4.50
11	Módulo micro SD card Arduino	1	$ 5.50	Módulo micro SD card Arduino	1	Und.	$ 5.50	$ 5.50
12	Cables de alimentación batería 9V	1	$ 1.30	Cables de alimentación batería 9V	1	Und.	$ 1.30	$ 1.30
13	Batería 9V	1	$ 4.75	Batería 9V	1	Und.	$ 4.75	$ 4.75
14	Cables de protoboard	1	$ 2.50	Cables de protoboard	1	Paq.	$ 2.50	$ 2.50
15	Protoboard pequeño	1	$ 3.25	Protoboard pequeño	1	Und.	$ 3.25	$ 3.25
							TOTAL	$ 124.37

Tabla 12

Costos de procesos de construcción

Procesos de construcción		
Ítem	Procesos de Construcción	Total
1	Corte en acrílico con plasma	$ 6.00
2	Corte a chorro en aluminio	$ 10.00
3	Maquinado de eje	$ 25.00
4	Armado marco de rotor	$ 25.00
5	Maquinado de bushing	$ 20.00
6	Soldadura marco y base	$ 40.00
7	Armado caja de instrumentos eléctricos	$ 60.00
8	Pintura anticorrosiva y esmalte	$ 10.00
	TOTAL	$ 196.00

Discusión

Los resultados que se dieron a partir de la construcción del rotor tipo Savonius no fueron tan alentadores, desde su lugar de instalación hasta la construcción del mismo.

Inicialmente, el lugar en donde instaló la maqueta no era el adecuado, sin embargo el estudio se lo hizo para conocer la factibilidad de la zona para aprovechar la energía eólica. La poca eficiencia se dió porque en la zona los vientos son poco constantes con excepción de dos meses en el año, aparte la velocidad del viento es muy baja, contado con apenas de un 0.4 a 0.5 m/s de promedio anual.

Otro de los puntos desfavorables es, la zona tiene edificaciones y vegetación alta, aparte la zona cuanta en el sur y el este con montañas bajas.

Se quiso probar el tipo de aspas que se juntan en un eje central, al momento de las pruebas la contrapresión que se generaba en la mitad no permitía que comience el giro con facilidad, esta bajaría la eficiencia y no la maqueta no aprovecho todo el recurso eólico.

Comparado con los rotores tipo Savonius que tienes las aspas en desfase, la eficiencia es menor, y si hablamos de una eficiencia teórica del 0.15, en este caso disminuirá aún más.

Conclusiones

Este proyecto provee un diseño que podría cubrir la falta de producción energética en zonas rurales del país, y para abastecer de energía a lugares afectados por desastres naturales, por tanto es un avance de posibilidades de utilización de energías renovables en estos casos.

En el aspecto económico la construcción de esta maqueta es de aproximadamente $320, los materiales son de fácil adquisición en el mercado nacional, y las prestaciones que genera son muy significativas.

Las dimensiones de la maqueta son pequeñas, y su transporte no es complejo, por tanto se presta para ser instalada en lugares remotos y de difícil acceso.

Existen lugares en Ecuador donde el prototipo tendría una mejor eficiencia, en la Universidad Internacional SEK campus Carcelén no tiene una buena eficiencia debido a

que la velocidad del viento es muy baja al igual que su frecuencia. De esta forma no se podrá generar mucha energía en su instalación actual.

El material que se escogió para la construcción de la maqueta está sobredimensionado, ya que las tensiones y esfuerzos a los que será sometido son muy bajos, esto se debe a que es difícil encontrar material más delgado para su construcción en el mercado local.

Recomendaciones

Para el termo conformado del acrílico, verificar el datasheet de mismo ya que al momento de aplicarle calor se puede fundir el material.

Para facilitar el desmontaje y el mantenimiento de la maqueta, se recomienda que se la fabrique con piezas de unión.

Al momento de construir el aspa, es mejor hacerlo con un desfase en la unión de las dos aspas, ya que la generación de la contra presión hace que la maqueta tenga dificultad para iniciar el giro.

Escoger rodamientos de acuerdo a los requerimientos, se debe considerar que el de la parte inferior debe aguantar el peso de todo el rotor, por lo tanto al momento de escogerlo debe elegirse uno de altas prestaciones.

En la fabricación del eje central del motor, se necesita que se produzca la menor cantidad de vibraciones, estas normalmente las genera el rotor al intentar romper la inercia, por tal motivo se recomienda sobredimensionarlo y diseñar con mayor diámetro.

La maqueta tiene varias conexiones eléctricas, por tal motivo se aconseja construir una caja eléctrica, adicional construir una visera en el acceso de la tarjeta SD para que las condiciones climatológicas no alteren su correcto funcionamiento.

Se recomienda que la fuente de energía para el microcontrolador sea de la red eléctrica pública, con la batería corre el riesgo de agotarse y perderse la información no almacenada

Se recomienda revisar periódicamente los ajustes de la maqueta como pernos y tornillos, ya que el movimiento constante del rotor y los efectos del viento producen vibraciones y por ende el desajuste de los pernos, tornillos y tuercas.

Referencias

Antezana Núñez, J. C. (Septiembre de 2004). *Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador.* Recuperado el 2 de Junio de 2016, de Universidad de Chile: https://es.scribd.com/doc/139888434/Diseno-y-Construccion-de-un-Prototipo-de-Generador-Eolico-de-Eje-Vertical-Tesis

Arbeloa Sola, L., & Zurita Gabasa, J. (Julio de 2012). *Universidad Pública de Navarra.* Recuperado el 18 de Mayo de 2016, de Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural: http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/6667/57946.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ARCONEL. (15 de Marzo de 2016). *Agencia de regulación y control de electricidad.* Recuperado el 17 de Mayo de 2016, de http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/balance-nacional/

Arduino.cc. (06 de julio de 2017). *arduino.cc*. Obtenido de https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3

Atmosfheric Science Data Center. (2016). *Atmosfheric Science Data Center.* Obtenido de Atmosfheric Science Data Center

Canalejo Sánchez, D., & Font, X. (2011). *Generador eólico para uso doméstico*. Recuperado el 17 de Mayo de 2016, de http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12868/TFC-%20Daniel%20Canalejo%20S%C3%A1nchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Científicos Aficionados. (31 de Marzo de 2011). *www.cientificosaficionados.com.* Recuperado el 29 de Junio de 2016, de http://www.cientificosaficionados.com/foros/viewtopic.php?t=12623

Cueva, B. L. (Abril de 2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA PRODUCIR 20 WATTS.* Recuperado el 29 de Junio de 2016, de Escuela Politécnica Nacional: http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10538/1/CD-6238.pdf

DIRECT INDUSTRY. (s.f.). *Direct Industry*. Recuperado el 24 de Mayo de 2016, de http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/anemometro-73948.html

IEA. (13 de Mayo de 2016). *Internacional Energy Agency*. Recuperado el 17 de Mayo de 2016, de http://www.iea.org/statistics/monthlystatistics/monthlyelectricitystatistics/#d.en.34640

Ingeni-Arte. (s.f.). *Básicamente: Energía Eólica*. Obtenido de http://ingeni-arte.blogspot.com/p/basicamente-energia-eolica.html

Lledó Sánchez, E. (Diciembre de 2012). *Universidad Politécnica de Valencia.* Obtenido de Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino:

https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-14_08-11-20105077.pdf

Mastache Mastache, J. E. (Febrero de 2016). *cenidet.* Recuperado el 28 de Junio de 2016, de Análisis de un Generador Radial de Imanes Permanentes y Propuesta de una Metodología para Optimizar la Eficiencia: Propuesta de una Metodología para Optimizar la Eficiencia

MEER. (2015). *Inauguración Proyecto eólico Baltra*. Recuperado el 19 de Mayo de 2016, de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable: http://www.energia.gob.ec/inauguracion-proyecto-eolico-baltra-y-parque-fotovoltaico-puerto-ayora/

MEER. (2016). *Mapa Eólico del Ecuador.* Obtenido de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable: http://www.energia.gob.ec/biblioteca/

Méndez Múñiz, J. M., & Rodríguez Rodríguez, L. M. (2012). *Energía Eólica.* Madrid: Fundación Confemetal.

Monografías. (2010). *Monografías*. Recuperado el 31 de Mayo de 2016, de http://www.monografias.com/trabajos82/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua2.shtml

Moreno Figueredo, C. (s.f.). *Cubasolar*. Recuperado el 24 de Mayo de 2016, de http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm

Orduz Berdugo, O. I., & Suárez Pérez, J. E. (2011). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE.* Recuperado el 31 de Mayo de 2016, de UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER: http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137798.pdf

TECHNOKONTROL. (2016). *TECHNOKONTROL*. Recuperado el 28 de Junio de 2016, de http://technokontrol.com/en/products/generator.php

Verde Zona. (14 de Marzo de 2015). *Verde Zona*. Recuperado el 2 de Junio de 2016, de http://verdezona.blogspot.com/2015/03/energias-renovables-la-energia-eolica.html

Villarrubia, M. (2004). *Energía Eólica.* Barcelona: Ceac.

Anexos