FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA

CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS CON SISTEMA DE MEDICIÓN DE GIRO

AUTOR:
MANUEL F. TELLO YÉPEZ

2017-08-17

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 Maite, 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 por abrirme las puertas de la institución para cumplir con mis sueños.

RESUMEN

Este proyecto describe el cálculo, diseño y construcción de una turbina 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.

En la parte inicial se estudia la situación energética mundial, en Sudamérica y especialmente en el país de Ecuador.

A continuación, se analizará el sitio donde se instalará el modelo, y se estudiará el recurso eólico disponible en la zona.

Posteriormente, se realizaron cálculos necesarios para diseños mecánicos y eléctricos.

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

INTRODUCCIÓN

JUSTIFICACIÓN

Las energías renovables:

- ✓Solar
- ✓Eólica
- ✓Hidráulica

son ilimitadas, no contaminan el ambiente y son más saludables.

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

El estudio de energías renovables es muy importante en la actualidad, debido al alza de los precios del petróleo y al calentamiento global.

Por otro lado, en estos días no es suficiente “producir energía” sino hacerlo con una alta eficiencia.

El aprovechamiento de la energía eólica es una de las opciones para detener los daños que la sociedad causa a 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, se fundamenta la decisión de:

- ✓ diseñar
- ✓ construir

un dispositivo aerogenerador de eje vertical.

Adaptar :

un sistema de medición de velocidad de giro

El propósito es analizar el rotor, y de esa forma fomentar la investigación dentro del campo de las energías limpias.

ESTADO DEL ARTE

Desde hace mucho tiempo:

- Animal
- Carbón y su bajo costo
- Petróleo
- Gas natural (no cumple con el 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.

Esta energía llega en forma de radiación permitiendo que esta mantenga una temperatura más o menos constante, posibilitando que haya vida.

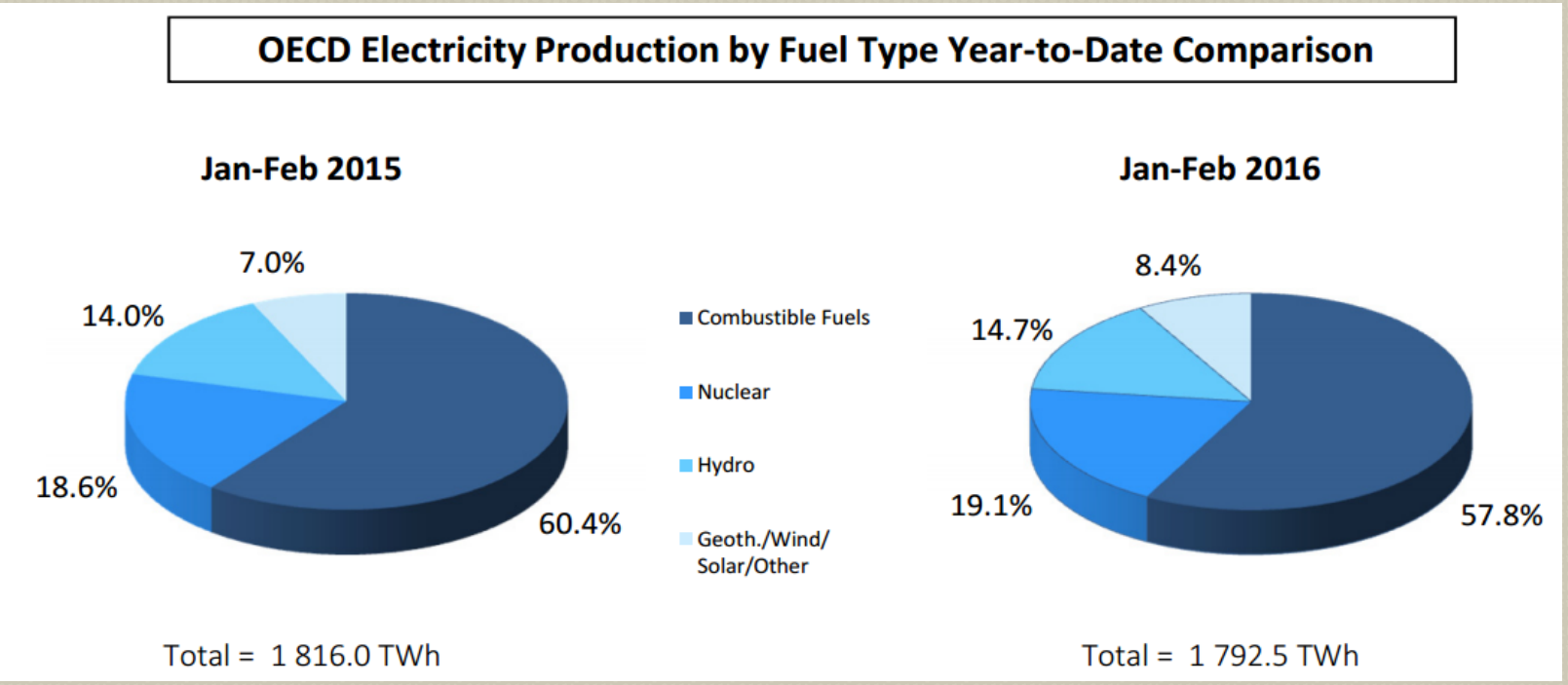
Dentro de la generación de energías renovables se pueden destacar las que tienen mayor desarrollo tecnológico y por tanto mayores posibilidades de competir en el mercado. El Sol está presente en todas ellas.

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

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)



Porcentaje de producción energética mundial. (IEA, 2016)

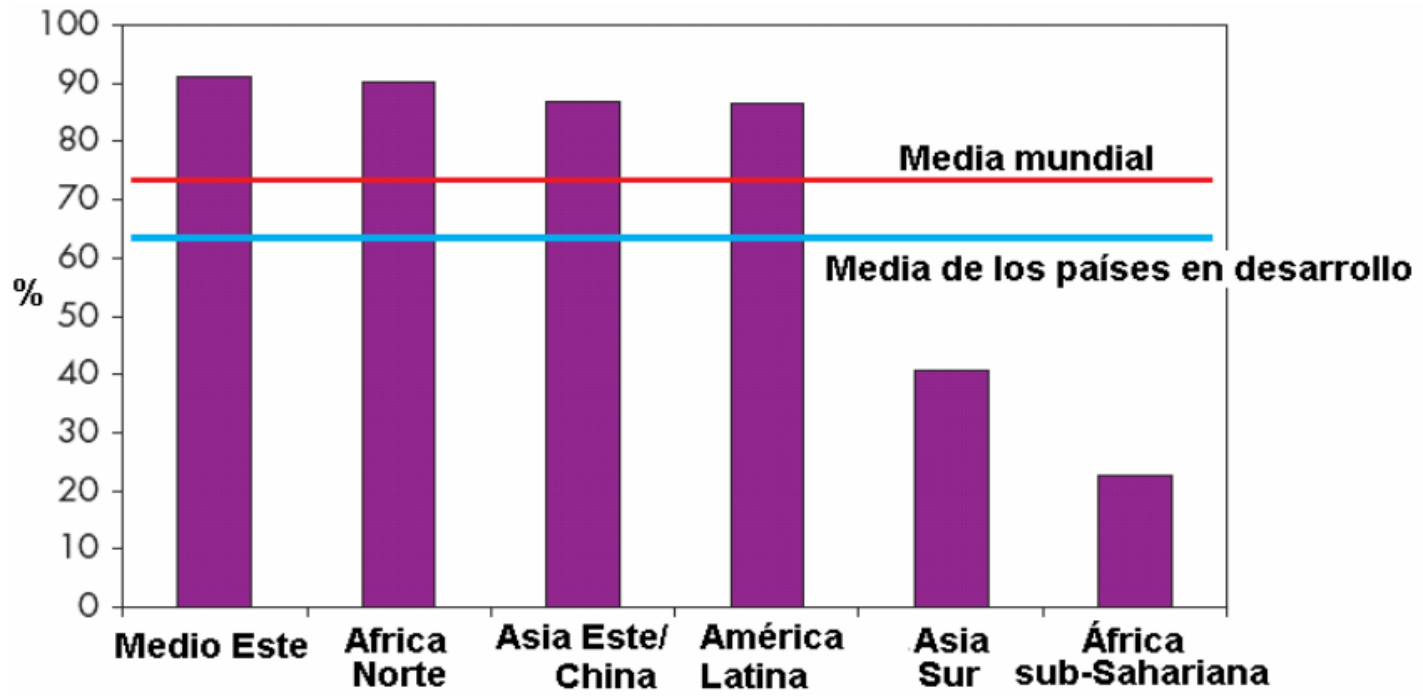
Producción energética mundial en TWh. (IEA, 2016)

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%

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.

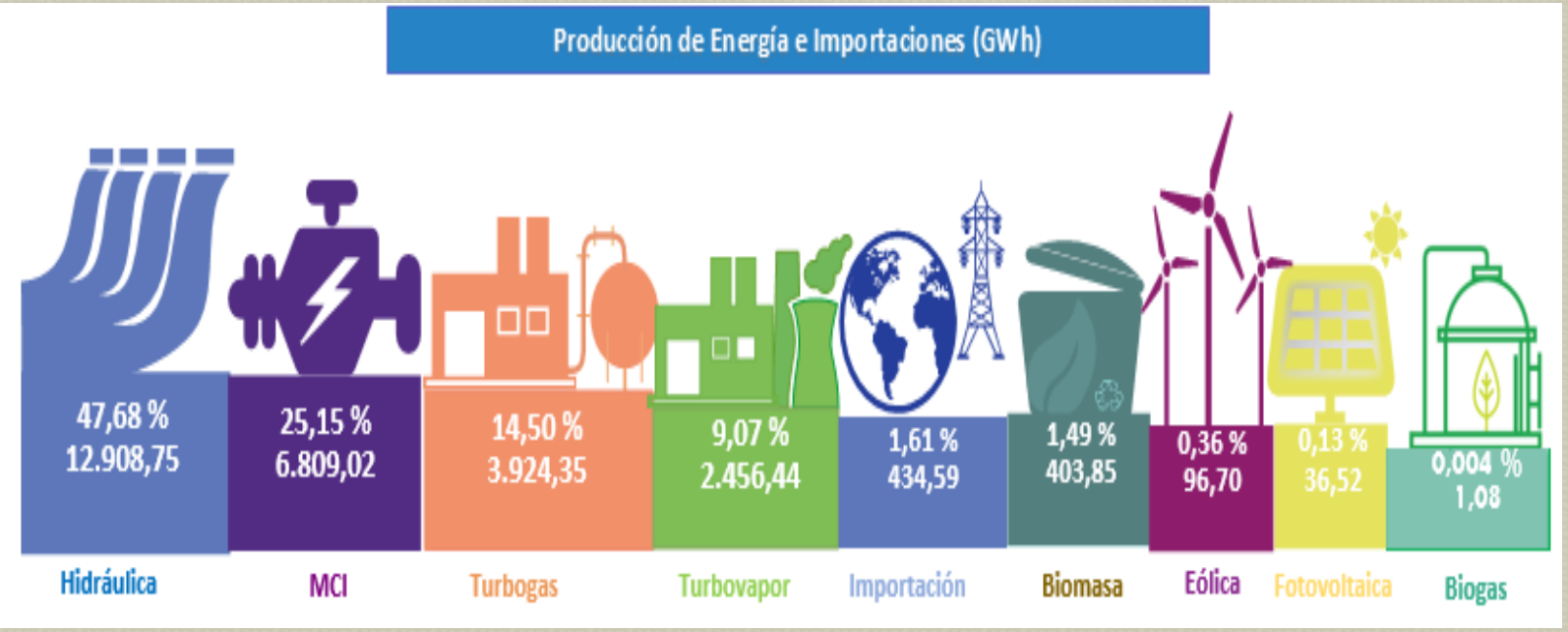
Si se analiza por regiones, 509 millones de los no electrificados estarían en África Sub-Sahariana, 28 millones en el Sahara, 18 millones en China, 223 millones en el sur de Asia, 800 millones en la India y 56 millones en Sudamérica. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)



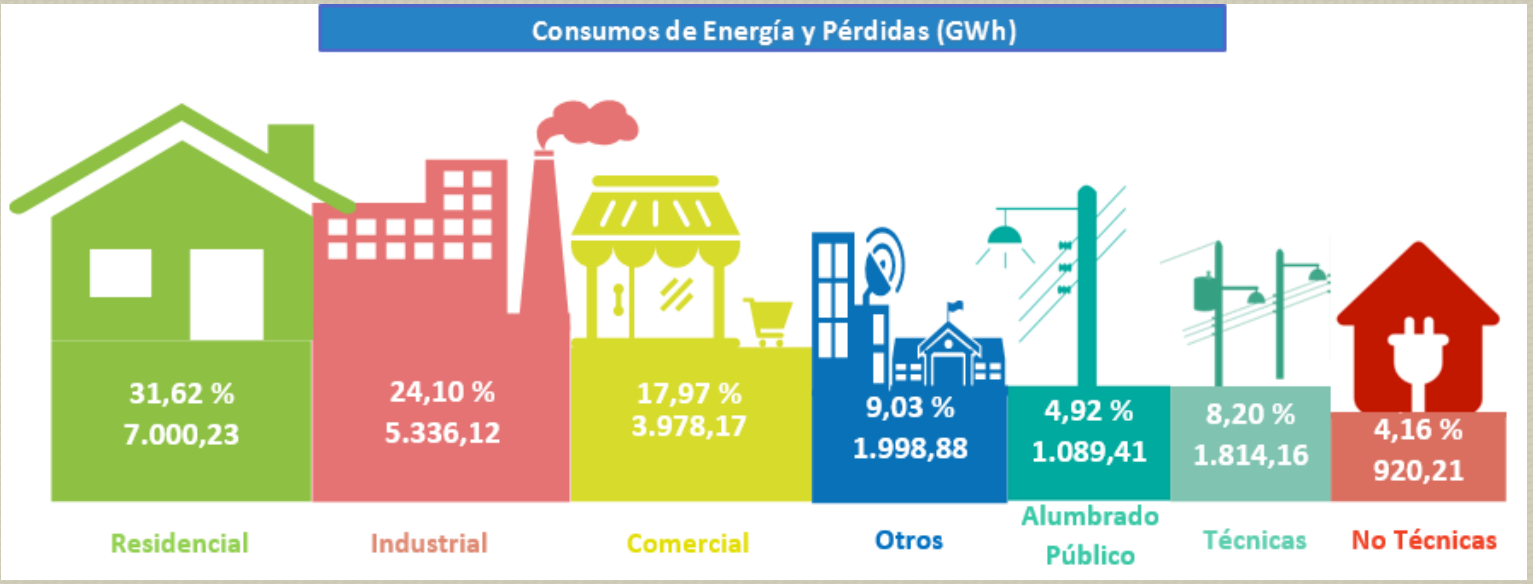
Porcentaje de electrificación mundial. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)

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)



Producción energética nacional. (ARCONEL, 2016)



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)
- Parque Eólico Villonaco con 16,5MW
- Parque Eólico Baltra-Santa Cruz ubicado en la provincia de Galápagos, el cual generará 2,5 MW en su primera fase. (MEER, 2016)

Parque Eólico Villonaco-Loja. (MEER, 2016)

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.

Consiste de un mecanismo de rotación provisto de palas, y de un generador eléctrico, 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

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 (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)

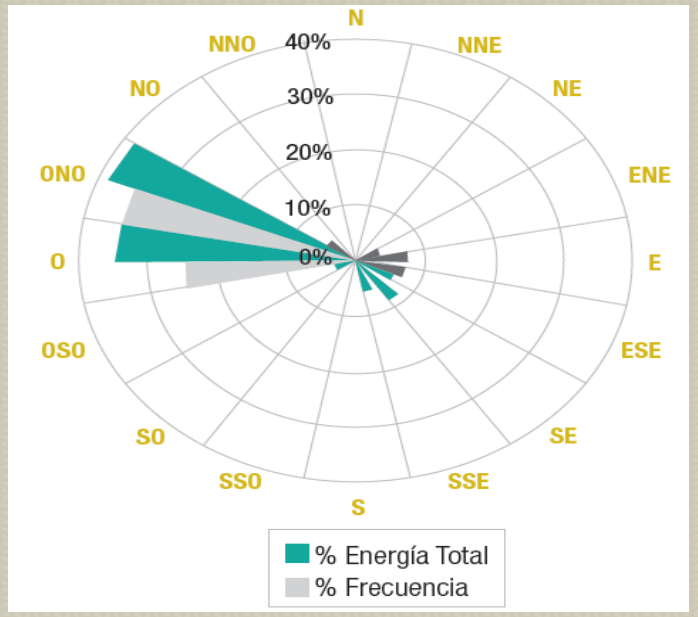
Aprovechamiento del viento

En cada uno de los pasos de conversión hay una serie de pérdidas, por lo que no toda la energía absorbida por la superficie terrestre se convierte en viento.

Hay que tener en cuenta que del viento no se puede extraer toda la energía. Así lo explica la Ley de Betz, en esta se concluye que 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, hay que tener en cuenta que tiene el inconveniente de que el viento es disperso y aleatorio.
La velocidad del viento es una magnitud vectorial y ésta varía de forma aleatoria tanto en módulo como en dirección y sentido. (Villarrubia, 2004)



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.

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

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. (Villarrubia, 2004)

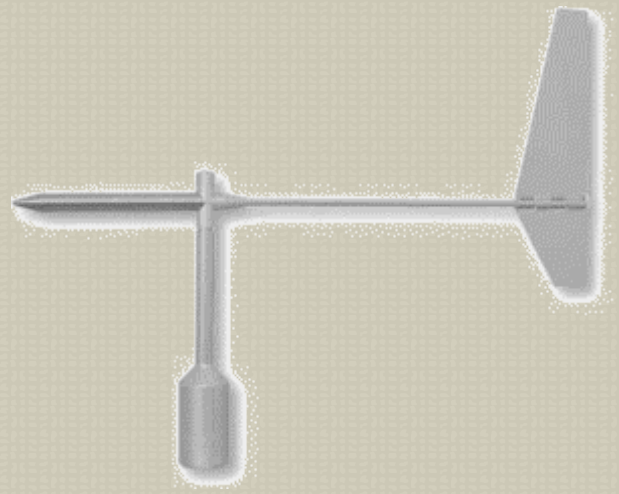
Ejemplo de Anemómetro de rotación. (DIRECT INDUSTRY, s.f.)

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.

Debido a que las mediciones varían, suele hacerse lo mismo que en el caso de la velocidad, se promedian valores instantáneos que se toman aproximadamente cada 10 minutos. (Villarrubia, 2004)



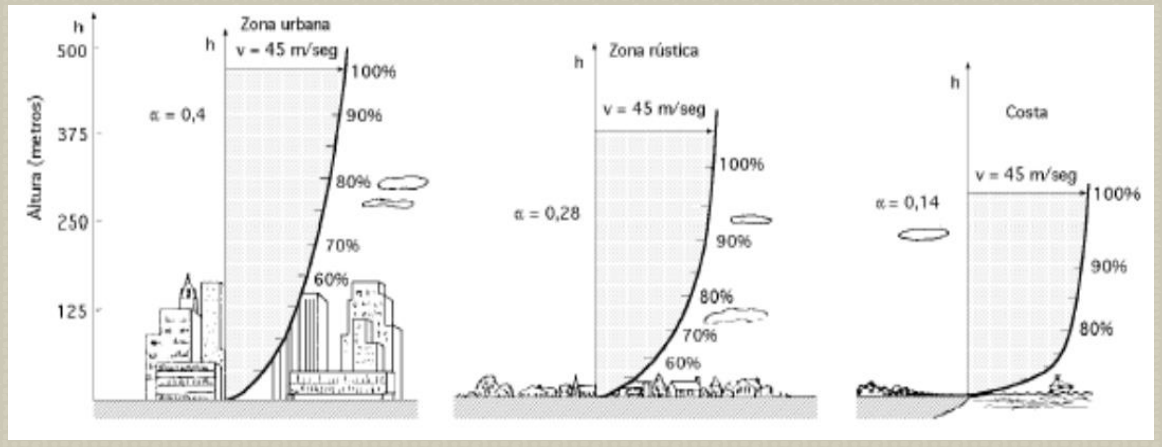
Ejemplo de Veleta. (Moreno Figueredo, s.f.)

Variación de la velocidad del viento con respecto a 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).

Conforme se separa del terreno, los efectos de rozamiento disminuyen y por lo tanto, la velocidad del viento aumenta.

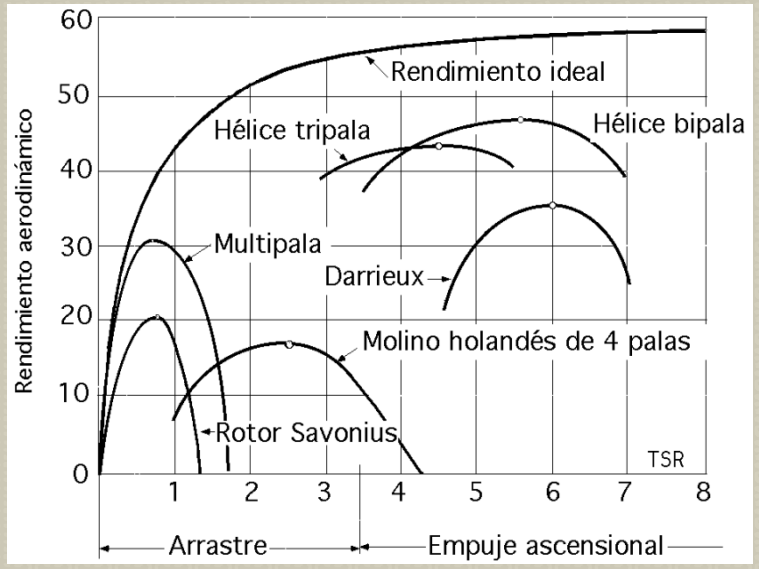
La variación de la velocidad del viento con la altura depende de la rugosidad que tenga el terreno. (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012)



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.



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

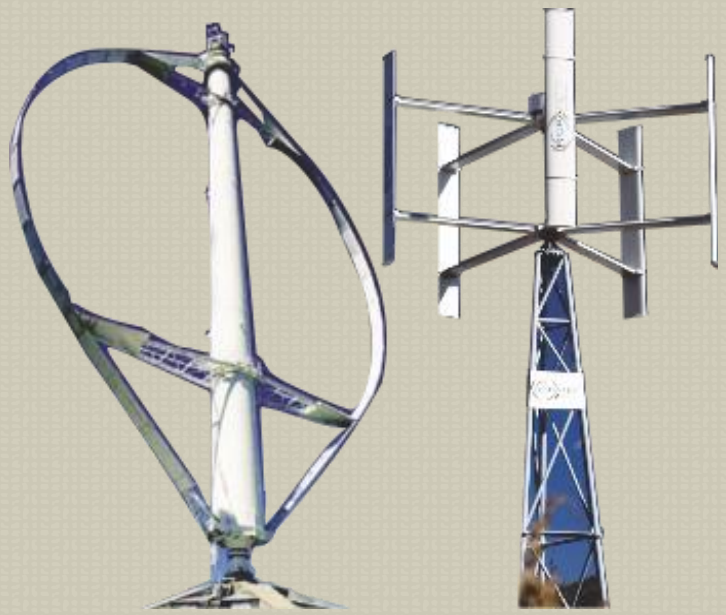
Aerogeneradores de eje vertical

Son aquellos en los que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo.

Tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento.

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)

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. (Orduz Berdugo & Suárez Pérez, 2011)



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

Rotor Darrieus. (Verde Zona, 2015)

Rotor Darrieus

Es el más popular de los aerogeneradores de eje vertical. Permite mayores velocidades que las del rotor Savonius.

Consta de unas finas palas con forma de ala de avión simétricas, con una curva especial diseñada y hace que los alerones experimenten una fuerte fuerza centrífuga.

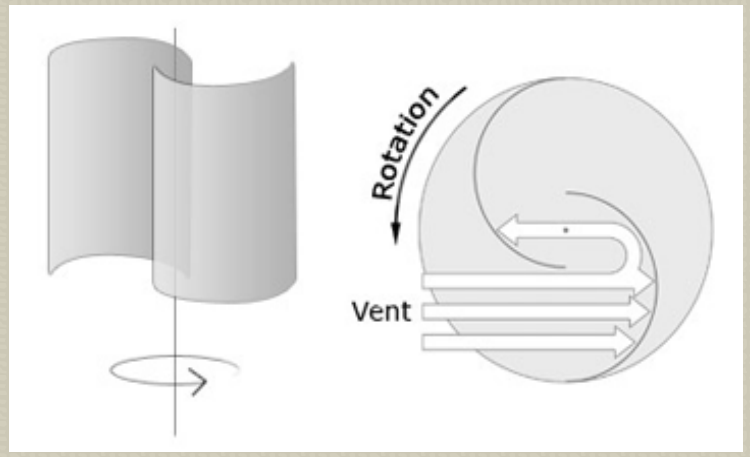
Este tipo de rotor no puede arrancar por sí mismo, se debe usar un sistema de arranque secundario. (Antezana Núñez, 2004)

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.

Debido a la resistencia al aire de este tipo de rotor, solo puede ser utilizado a bajas velocidades. (Antezana Núñez, 2004)



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

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

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

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
- Gravedad
- Peso

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

Datos anemómetro Universidad SEK

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

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:

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**

- 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.

- 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.

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

Las siguientes ecuaciones fueron tomadas del NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción), que se la puede descargar de la página web del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.

Vb: velocidad corregida del viento

Vmax: velocidad máxima

σ: $factor\ corregido\ del\ viento$

$$Vb = Vmax\ \sigma$$

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

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

La siguiente ecuación sirve para calcular la presión que ejercerá el viento en cualquier estructura.

$$P: presión$$
$$\delta: densidad$$

$$P = \frac{1}{2} * \delta * Vb^2 * Ce * Cf$$
$$P = \frac{1}{2} * 1.25 \frac{kg}{m^3} * \left(11.01 \frac{m}{s}\right)^2 * 0.8 * 1.5$$
$$P = 90932\ Pa$$

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

$$A: área$$
$$b: base$$
$$h: altura$$

$A = (b1 * h1)$ $A = 0.209\ m^2$

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

F: fuerza

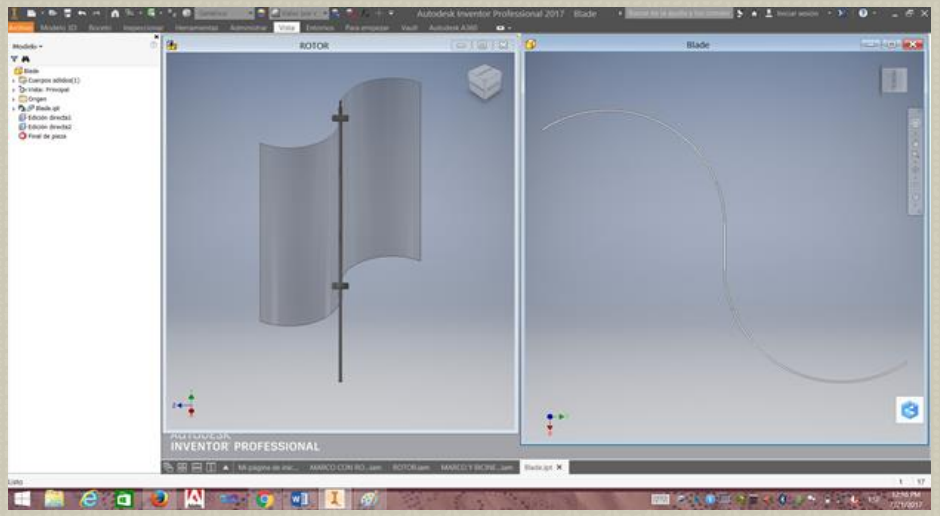
$$F = P * A$$

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

$$F = 19{,}007N$$

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.



Diseño de Aspas.

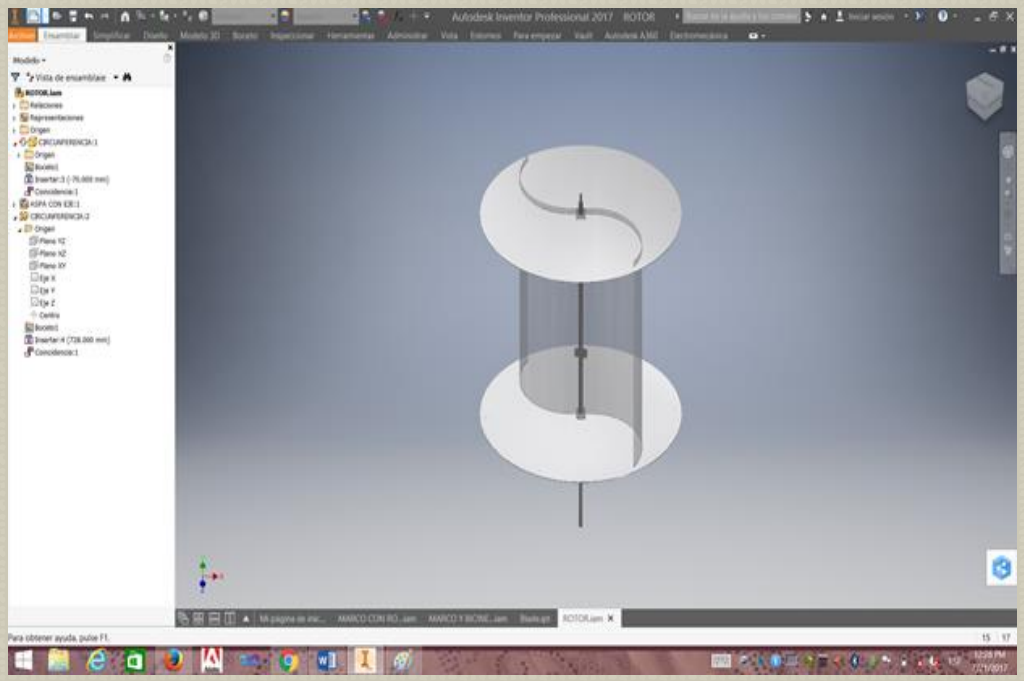
El material que se escogió es el Poli-metilmetacrilato, más comúnmente conocido como vidrio acrílico.

Las ventajas de este material son:

- Resistencia a las cambios ambientales de temperatura,
- Peso es bajo,
- Plástico se presta para el termo conformado.

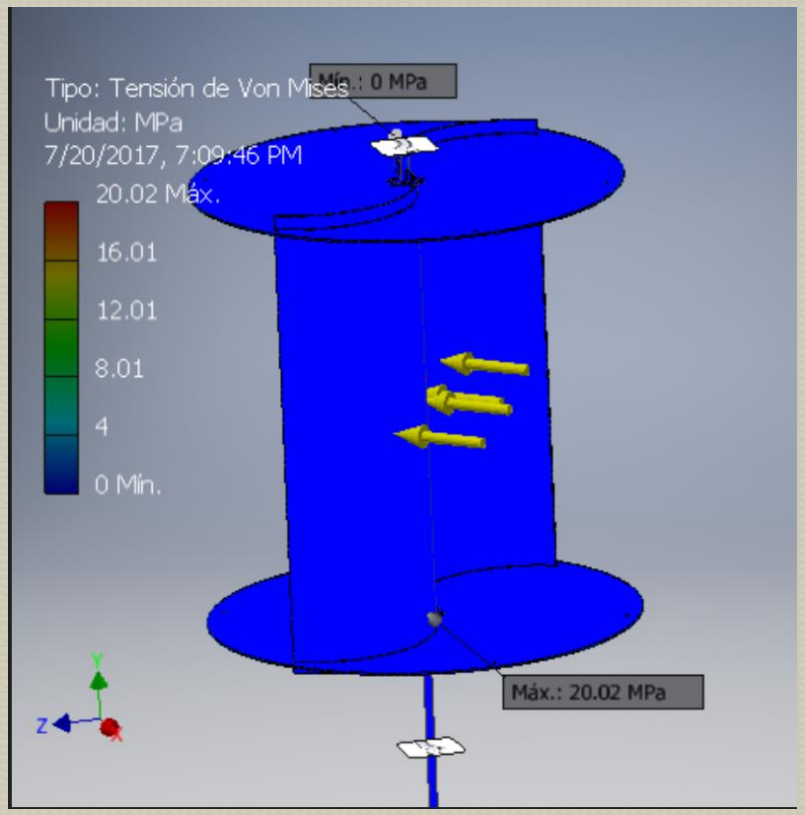
Se realizaron los cálculos de fuerza del viento y se analizó la fluencia de materiales según Von Mises.

Se realizó el análisis en resistencia y en falla.

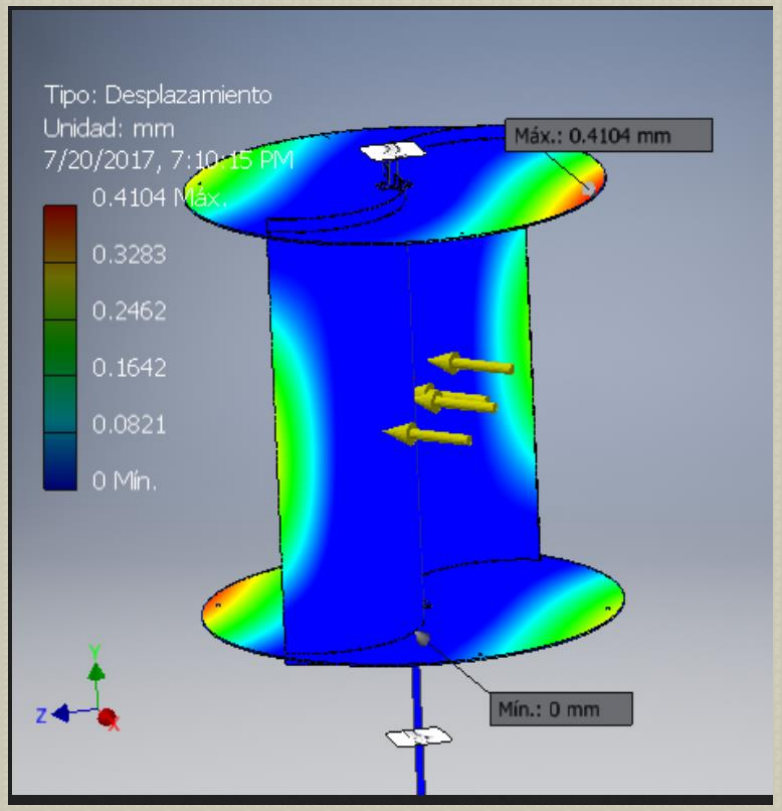


Diseño de Rotor.

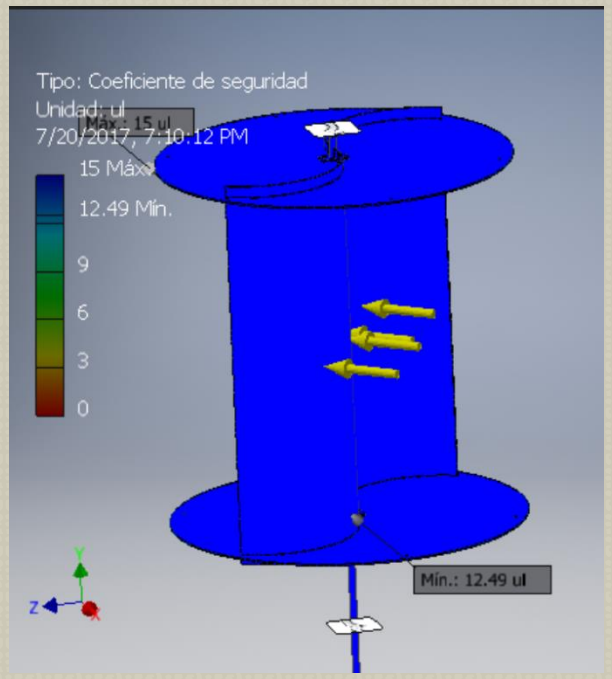
Análisis de Resistencia de Aspas



Análisis de resistencia según Von Mises.



Análisis de desplazamiento de resistencia.



Factor de Seguridad.

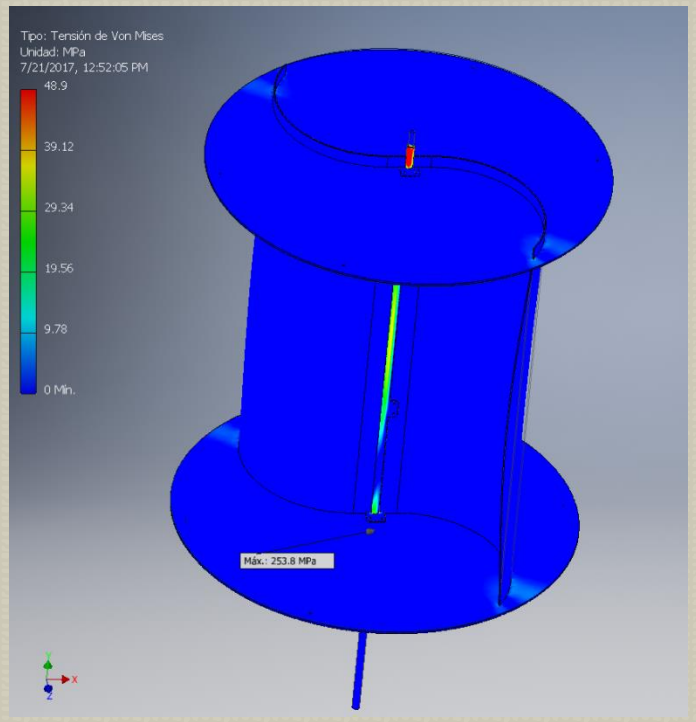
La tabla explica un resumen acerca del análisis de resistencia, con los datos hallamos la tensión de Von Misses, la simulación también da un dato como el valor del desplazamiento que equivales a 0.4 mm.

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.

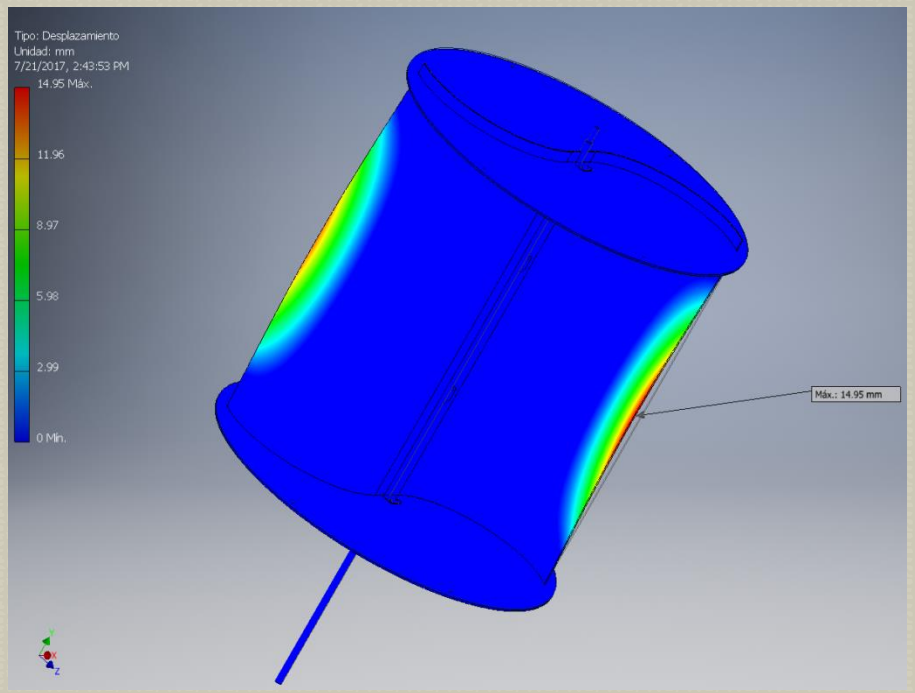
Análisis de resistencia según Von Misses

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

Análisis de Falla de Aspas



Análisis de falla



Análisis de desplazamiento de falla.

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 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.

Termo conformado de aspas

Se cortó el material con esmeriladora y disco de corte

Se construyó una plantilla de acero

Se alojó el acrílico dentro de la plantilla sujeto con pinzas de presión.

Se le aplicó temperatura durante 30 minutos con una lámpara de calor a 120 °C.

Termo conformado de las aspas.

Estructura

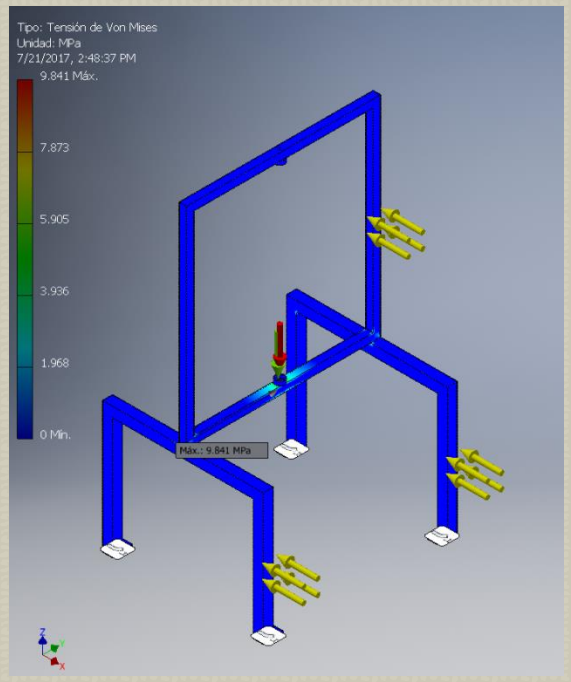
Consideraciones de diseño:

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

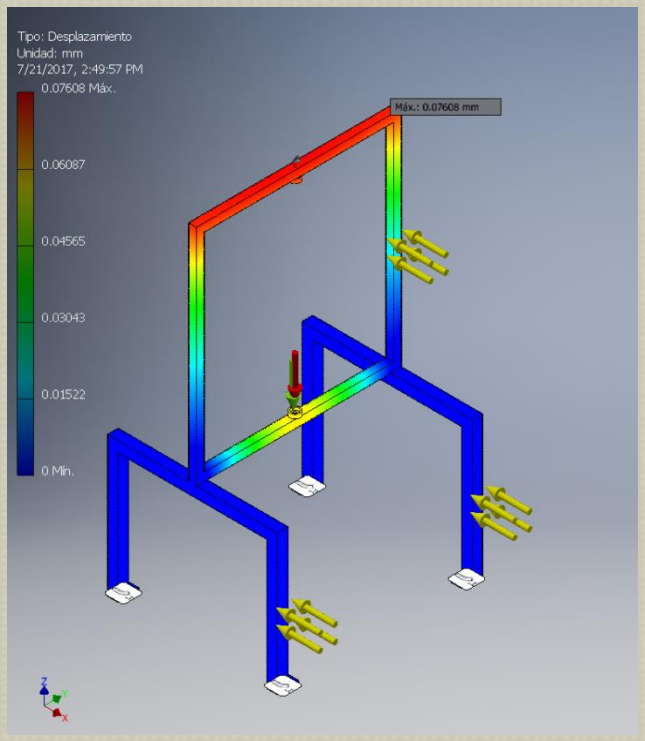
- Marco
- bocines
- rodamientos
- eje central de la maqueta
- base

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

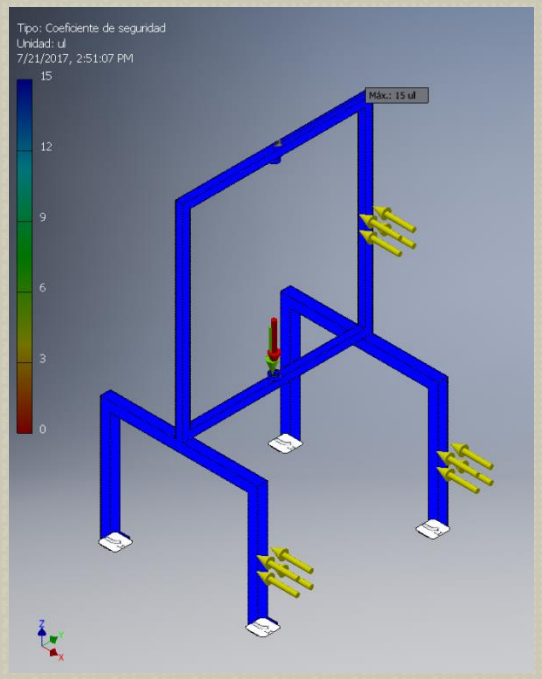
Análisis de Resistencia de Estructura



Análisis de resistencia según Von Mises.



Análisis de desplazamiento de resistencia.

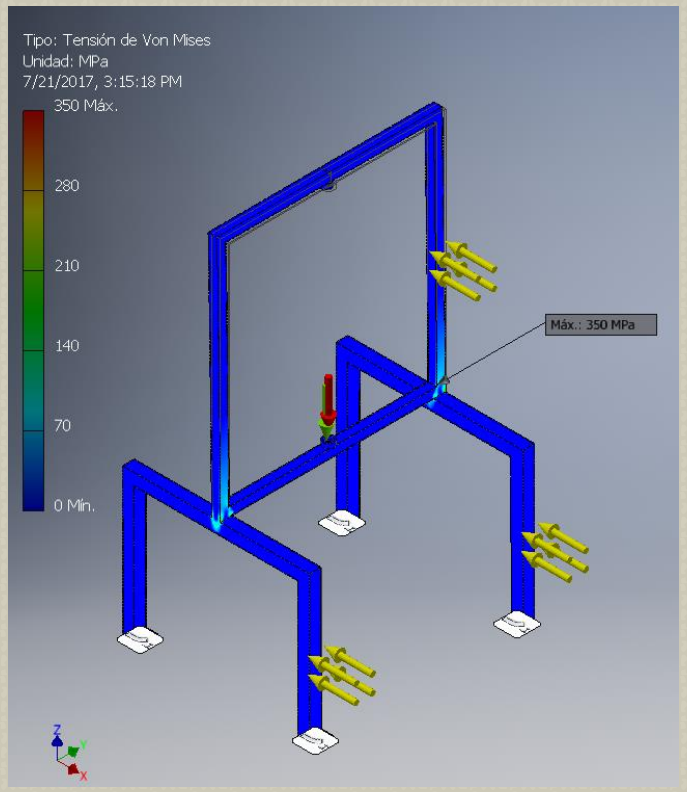


Análisis de Factor de seguridad.

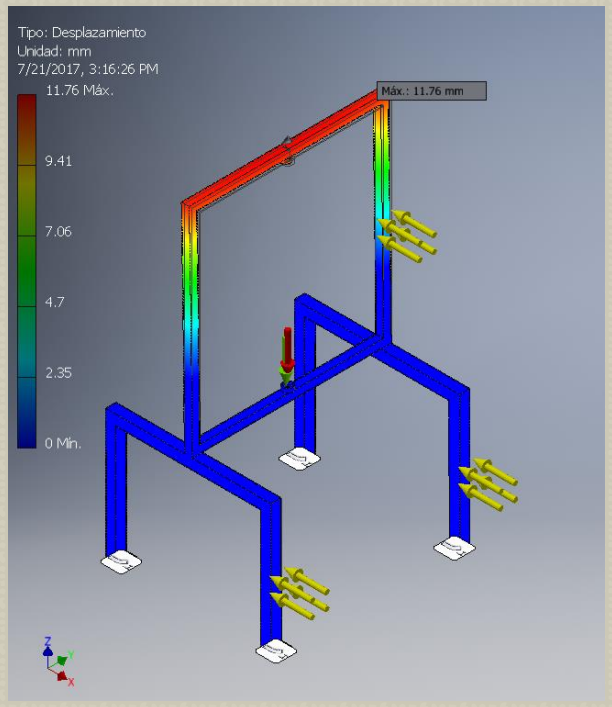
Análisis de resistencia según Von Misses

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

Análisis de Falla de Estructura



Análisis de falla.



Análisis de desplazamiento de falla.

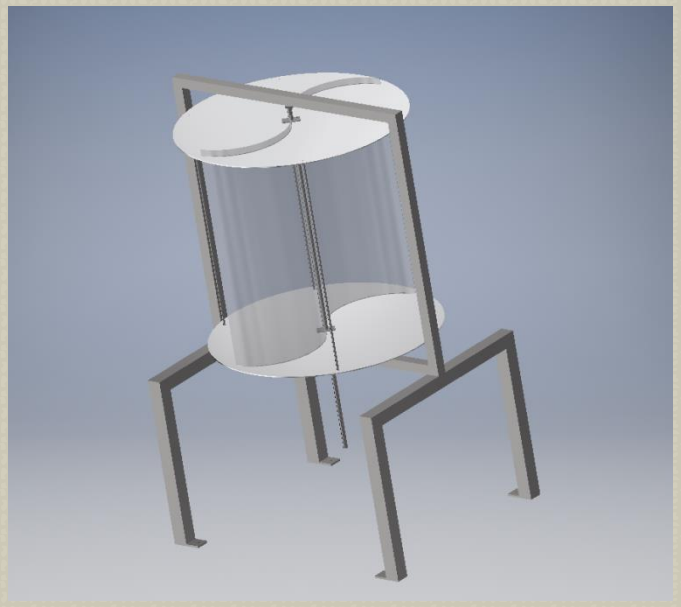
Análisis de falla según Von Misses

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 habla acerca del análisis de falla de la estructura, para calcular la fuerza y velocidad del viento a la que va a fallar la 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.



Diseño de Estructura.

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

Marco de aerogenerador tipo Savonius.

DISEÑO ELÉCTRICO

- Bushing maquinado en torno y con prisioneros.
- Módulo Encoder modelo KY-040 para Arduino.
- Microcontrolador marca Arduino y modelo Uno para poder energizarlo.
- Módulo micro SD Card.
- Conector batería 9V.

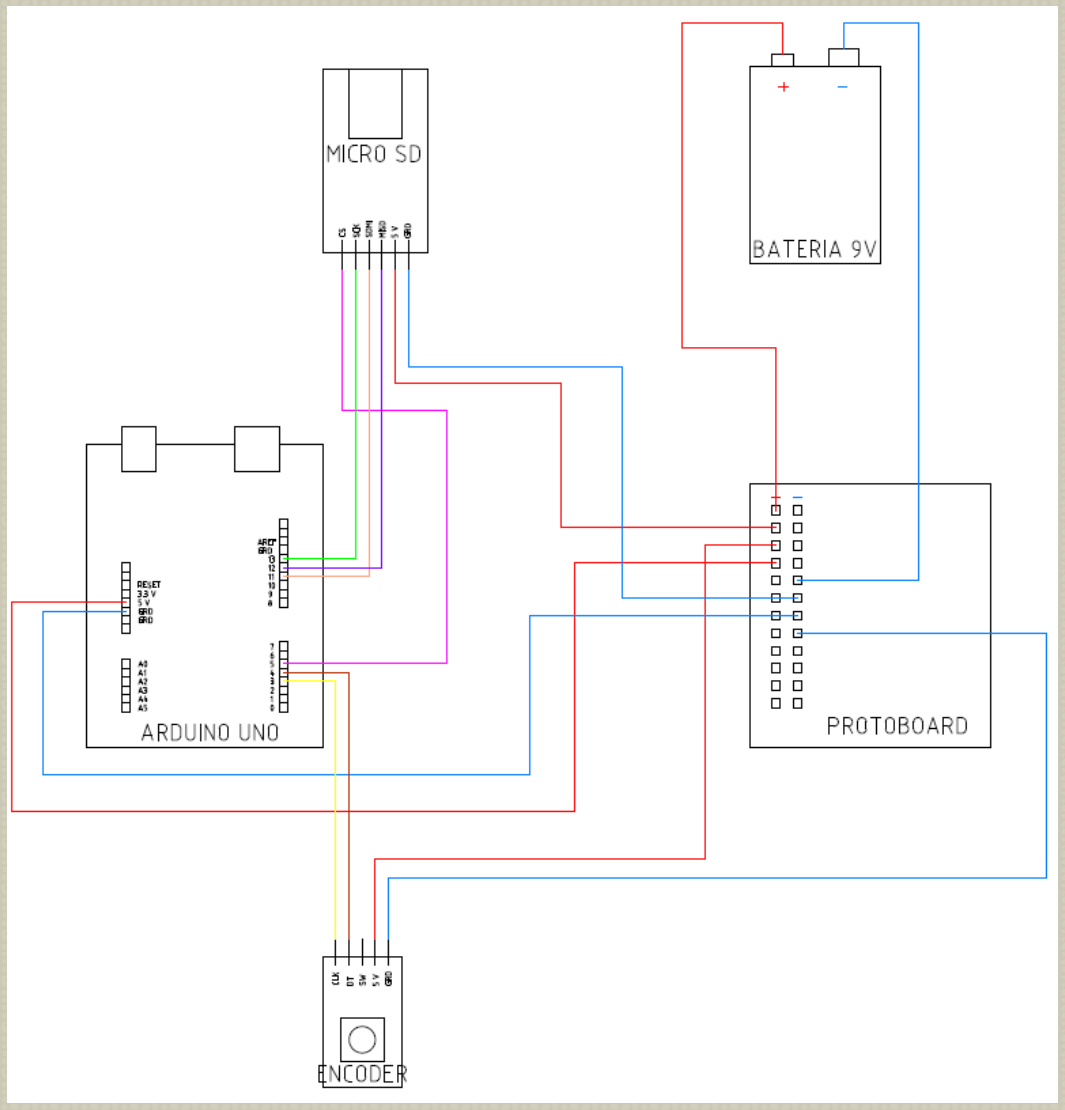


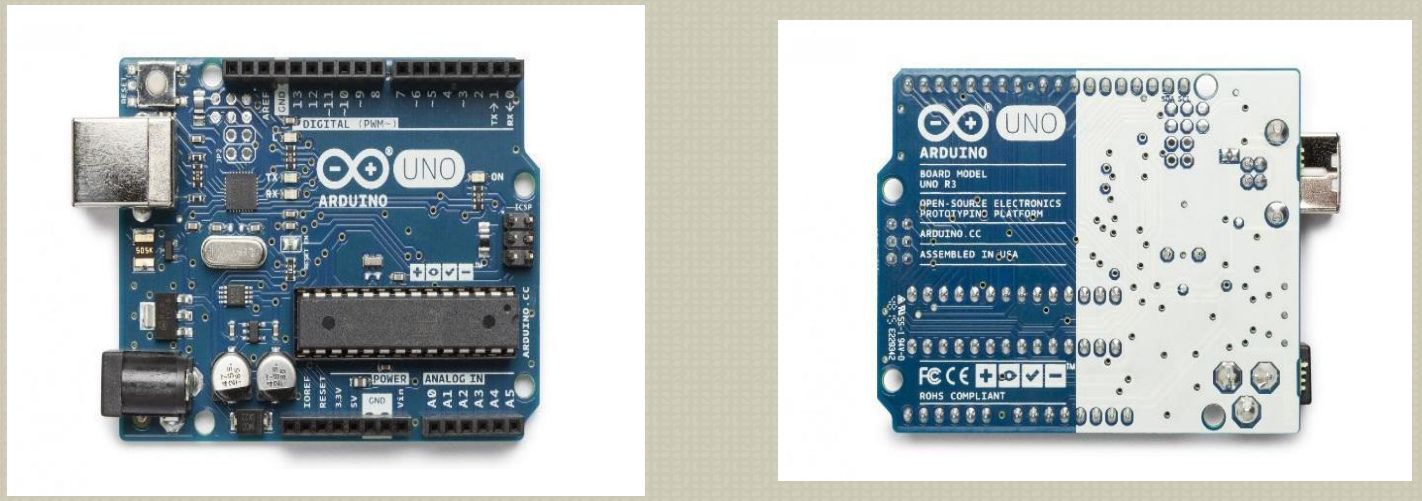
Diagrama eléctrico.

DISEÑO SOFTWARE

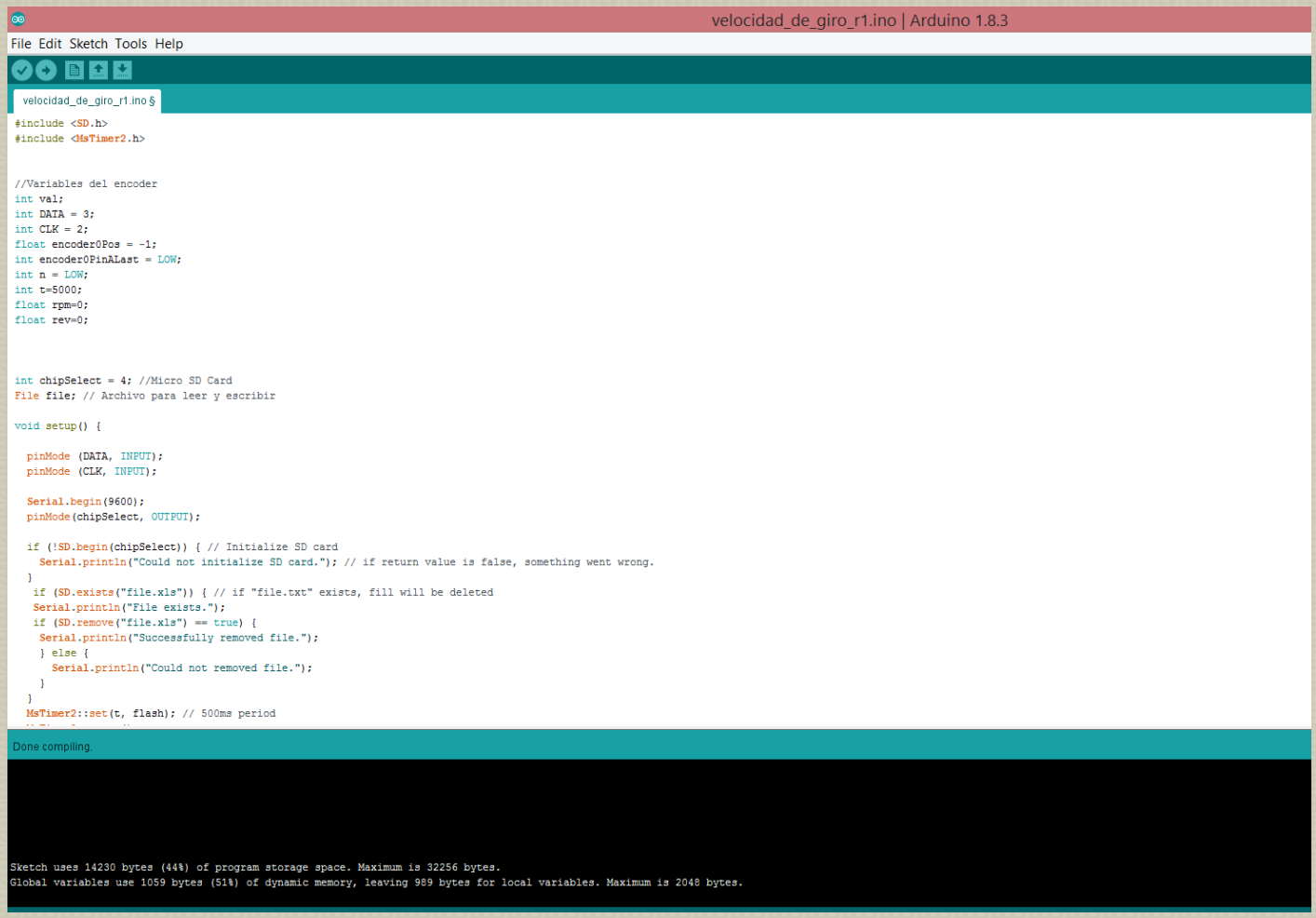
Hardware y Software

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 es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar.



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



Programa en software Arduino 1.8.3.

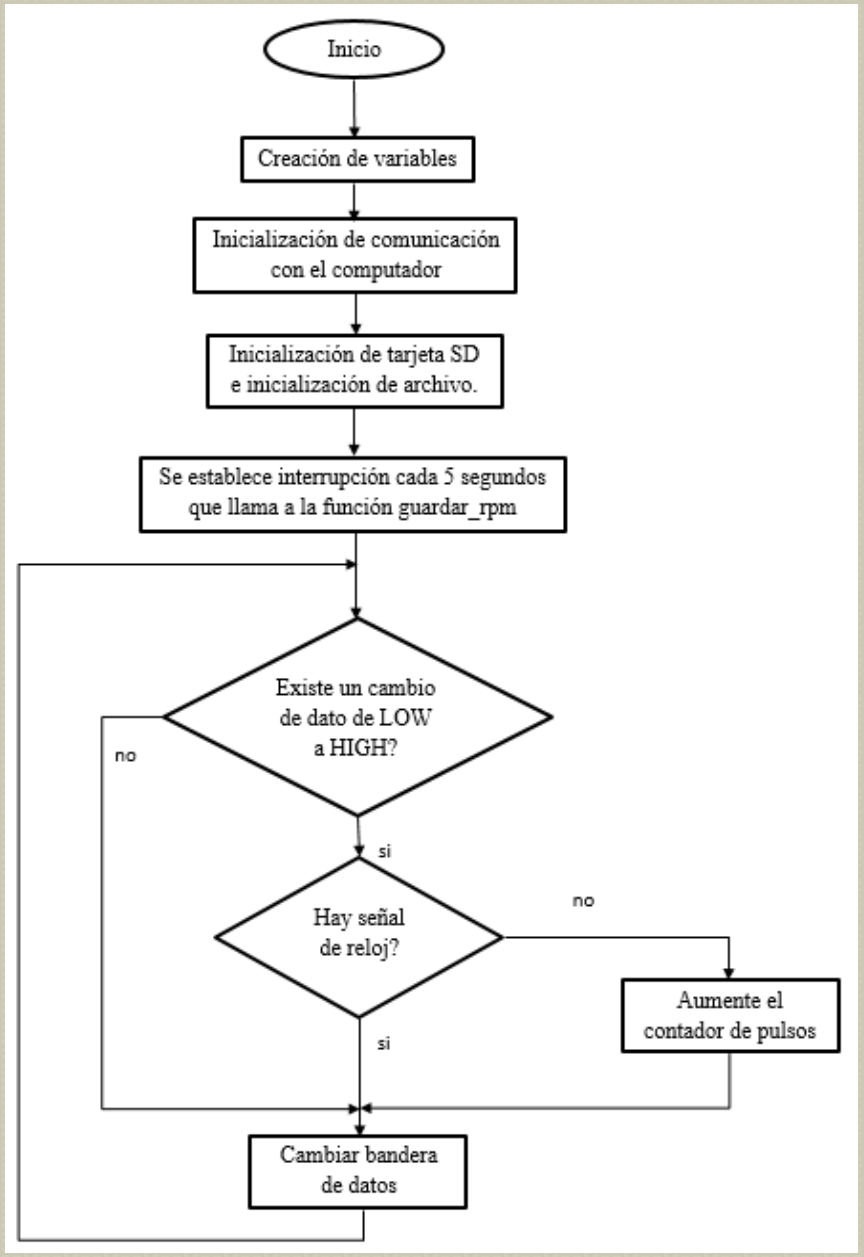


Diagrama de Flujo programa.

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.

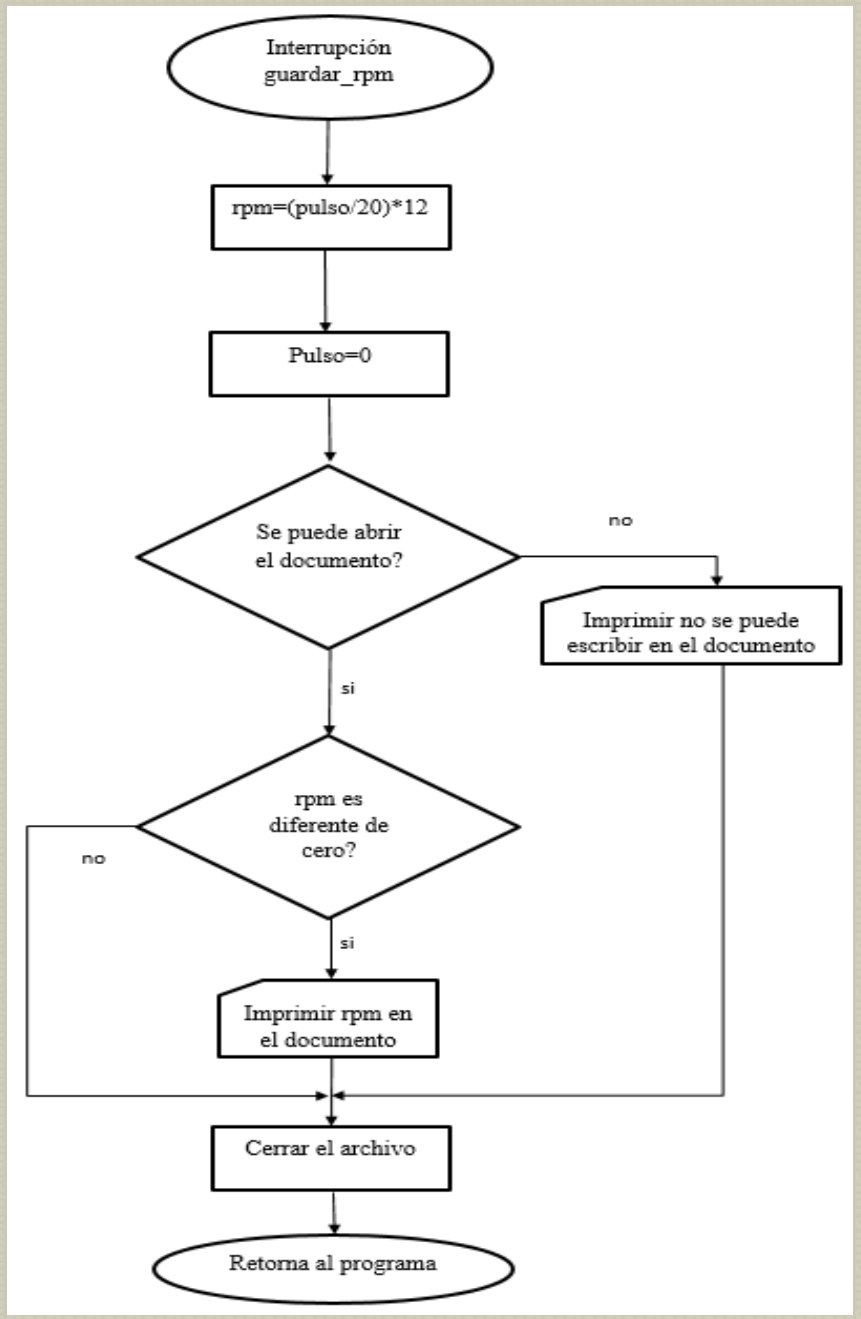


Diagrama de Flujo función guardar_rpm.

Resultados

Con respecto 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.

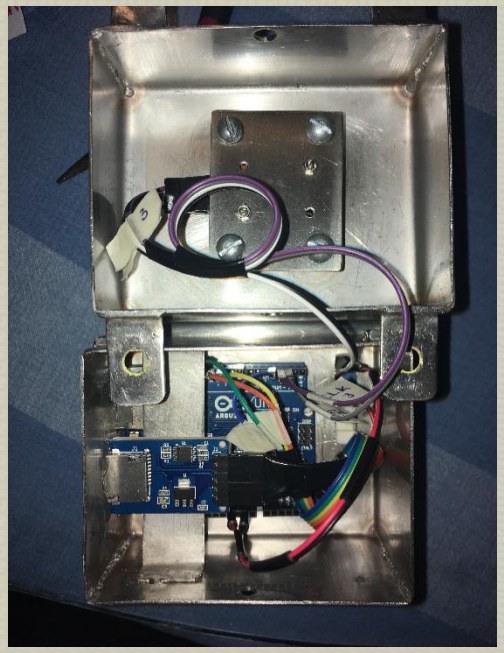
Instalación de maqueta.

Funcionamiento de maqueta en su ubicación.

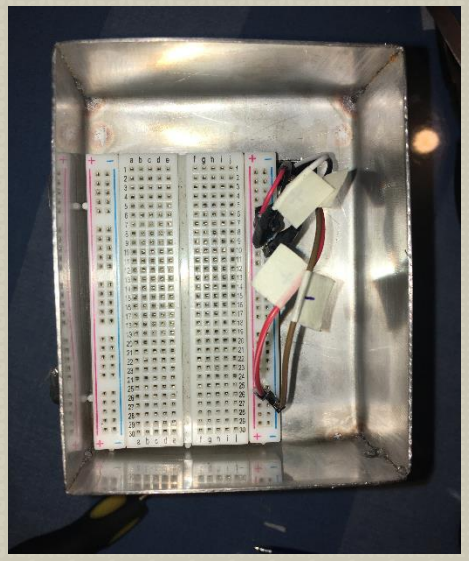
Vegetación alta en la proximidad de la maqueta.

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

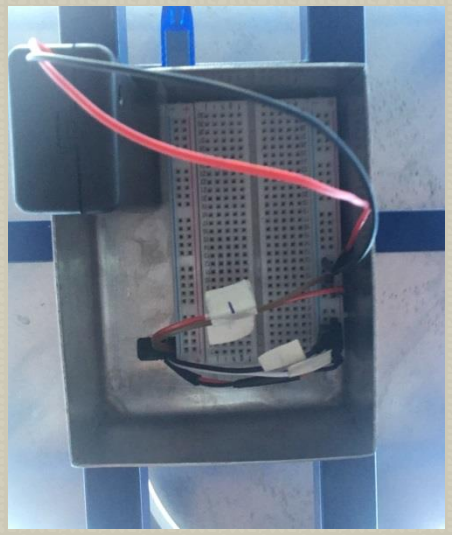
La caja que contiene las conexiones eléctricas fue diseñada en acero inoxidable, pero debidamente aislada, por lo tanto no ocurrieron problemas eléctricos.



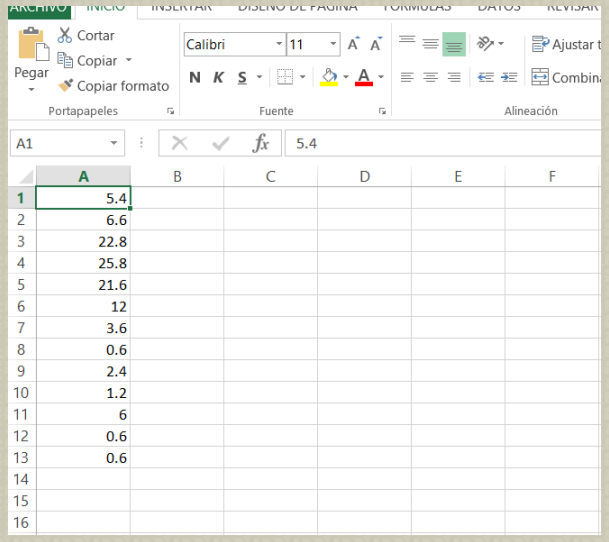
Conexión eléctrica sistema de medición de giro.



Conexión eléctrica, energización de sistema.



Energización con batería.



Visualización de datos en formato de Excel.

Refiriéndose a 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.

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

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

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

El lugar en donde se instaló la maqueta no era el adecuado.

La poca eficiencia se dio 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.

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 aprovechó todo el recurso eólico.

Comparado con los rotores tipo Savonius que tienen las aspas en desfase, la eficiencia es menor, y si hablamos de una eficiencia teórica del 0.2, 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.

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

Las dimensiones de la maqueta son pequeñas, y su transporte no es complejo.

Existen lugares en Ecuador donde el prototipo tendría una mejor eficiencia.

El material que se escogió para la construcción de la maqueta está sobredimensionado.

Recomendaciones

Para el termo conformado del acrílico, verificar el datasheet de mismo.

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.

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.

La maqueta tiene varias conexiones eléctricas, por tal motivo se aconseja cubrirlas de condiciones ambientales.

Se recomienda que la fuente de energía para el microcontrolador sea de la red eléctrica pública.

Se recomienda revisar periódicamente los ajustes de la maqueta como pernos y tornillos.