

Diseño y Fabricación de una Turbina Eólica de Eje Vertical Impulsada por Drag

Resumen: En este trabajo se presenta el proceso de diseño y fabricación de una turbina eólica de eje vertical impulsada por drag, pensada para operar en la zona urbana de la ciudad de Santa Fe, Argentina.

Es conocida la capacidad de las turbinas de eje vertical para aprovechar vientos que inciden desde cualquier dirección, y son las ideales para operar en zonas urbanas y con edificación existente.

Se presentan los estudios aerodinámicos realizados mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), y los estudios estructurales realizados mediante el método de los elementos finitos (FEM). Además, se explica el proceso de fabricación de la turbina con materiales compuestos, quedando para una etapa posterior el ensayo para validar el funcionamiento (contrastar con los resultados obtenidos por simulación computacional), mejorar la puesta en marcha y parada ante vientos excesivos, y optimizar el sistema de control de carga de la batería.

Palabras Claves: Turbina de eje vertical, Energía eólica, FEM, CFD.

Abstract: In this work is shown the process of designing and manufacturing of a drag driven vertical axis wind turbine, which is designed to operate at Santa Fe City urban zone.

It is well known the capability of vertical axis wind turbines to work and generate energy, no matter the wind direction, what makes them the first choice to use at urban zones, near buildings.

The aerodynamic studies made with Computer Fluid Dynamics (CFD), and structural studies made with the Finite Elements Method (FEM) are presented at this work.

Also the manufacturing method with composite materials, and still remaining to verify wind turbine real behavior, real power curve versus incident wind speed, start and stop at high wind speed, and optimize battery charge control system.

Keywords: Vertical axis wind turbine, Wind power, FEM, CFD.

Lucas D. Spies, Esteban A. Tacca.

Laboratorio de Flujoimetría FLOW (Lavaise 610, Santa Fe), Facultad Regional Santa Fe, UTN

Mail: lspies@frsf.utn.edu.ar, etacca@frsf.utn.edu.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Alejandro Albanesi en el marco del proyecto "Simulación computacional del proceso de solidificación de metales". (2015– 2016)

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de desarrollo tecnológico que surge en el ámbito académico. Tiene como objetivo el desarrollo, diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de baja potencia, a instalar en el techo de la torre administrativa de la UTN- Facultad Regional Santa Fe. El mismo, puede considerarse como continuación del trabajo presentado como “Estudio aerodinámico de turbinas eólicas Savonius mediante simulación computacional” [1].

Es de público conocimiento que en los últimos años el uso de energías renovables se encuentra en un pico de demanda, debido entre otras cosas, a la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles, para disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera y cuidar el planeta para futuras generaciones. En esta situación se recurre a la energía eólica, que utiliza la energía cinética disponible en las masas de aire en movimiento para generar energía eléctrica [2].

DISEÑO GEOMÉTRICO DEL AEROGENERADOR

Consideraciones previas

Dentro de la generación de energía eólica, podemos encontrar dos grandes grupos de turbinas empleadas: Las de eje horizontal, y las de eje vertical. Las primeras son ampliamente usadas, debido a su alto rendimiento aerodinámico y posibilidad de lograr grandes potencias, pero requieren constancia en la dirección del viento. En cambio las de eje vertical, son independientes de la dirección del viento, pero su rendimiento aerodinámico es bajo en comparación con las primeras [3].

A su vez, entre las turbinas de eje vertical, existe también una clasificación interna, debido a las fuerzas

aerodinámicas utilizadas por la misma para producir energía. Unas son las del tipo arrastre (drag), y otras del tipo sustentación (lift).

Las turbinas del tipo arrastre, son conocidas como Savonius, trabajan a velocidades de viento bajas, poseen alto torque de arranque y bajo rendimiento aerodinámico en comparación a las de sustentación.

Por las características de la ciudad de Santa Fe, donde los vientos promedios son bajos y cambian de dirección constantemente, se elige diseñar una turbina basada en el tipo Savonius.

Definiciones: Relación de velocidades y coeficiente de potencia

Antes de comenzar, se definirán algunos conceptos utilizados para caracterizar el funcionamiento de una turbina eólica.

En primer lugar definiremos la relación de velocidades, o “Tip Speed Ratio” (TSR), también caracterizado con la letra λ (lambda). La misma representa la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la turbina debido al giro de la misma, y la velocidad del viento incidente en la turbina, como describe la ecuación 1, donde ω es la velocidad de giro en radianes/segundos, r el radio de la turbina, y v_t es la velocidad del viento incidente.

$$TSR = \frac{\omega \cdot r}{v_i} \quad (1)$$

En segundo lugar definiremos el coeficiente de potencia (C_p), el cual representa al rendimiento aerodinámico de la turbina. Se obtiene de la relación entre la potencia entregada al eje de la turbina transmitida desde los álabes y la energía contenida en la masa de aire en movimiento que cruza por el área frontal

de la turbina tenida en cuenta. La misma se describe en la ecuación 2, donde T es el torque en el eje de la turbina, ρ la densidad del fluido atravesado y A es el área frontal de la turbina. El límite teórico del Cp es de 59,3%, y es llamado Límite de Betz.

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_i^3} \quad (2)$$

Optimización de parámetros

La geometría aerodinámica adecuada de los álabes para este tipo de turbinas, son aquellos que poseen un Cp aceptable, y a su vez contempla facilidad de construcción. Un tipo de geometría que cumple con estas características son álabes semicilíndricos con tapas planas en los extremos [1]. Para obtener la forma final de la turbina se realizaron simulaciones computacionales de turbinas con álabes semicilíndricos y distintas relaciones de tamaño y cantidad de álabes respecto al diámetro de la turbina, buscando obtener el mayor rendimiento aerodinámico (Cp máximo).

En cuanto al diseño aerodinámico óptimo o deseado, en este caso debe ser una geometría que aumente la fuerza de arrastre del perfil de cara al viento, y que de manera opuesta, genere la menor resistencia al mismo. De esta forma la diferencia de fuerzas a los lados del eje es mayor, y aumenta el torque generado.

Geometrías simuladas

Partiendo del modelo original del Savonius, se fueron probando distintas geometrías, variando parámetros como diámetros de las palas, curvatura, apertura en el eje, etc. [4]. Del post-proceso de las simulaciones, se propuso eliminar el área frontal de la

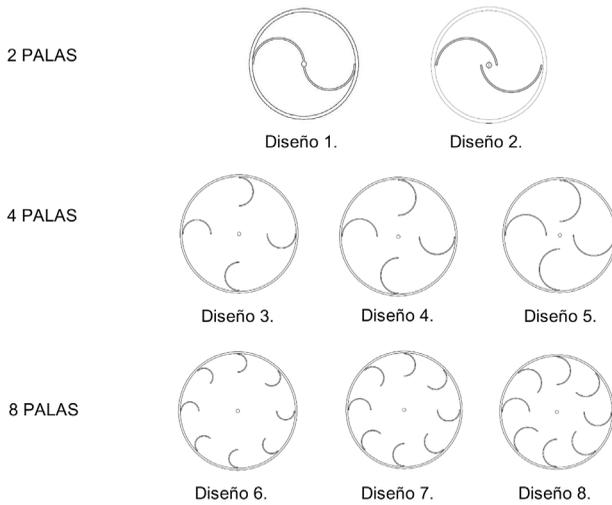
turbina cercana al eje, ya que la misma no realizaba un aporte de torque considerable, no solo por generar fuerzas bajas, sino también por encontrarse aplicadas las mismas a una corta distancia desde el eje.

Además de la geometría original de 2 palas, se probaron de 4 y 8 palas. Los torques obtenidos para estas últimas dos propuestas fueron mayores que en la Savonius original de 2 palas. Asimismo para cada cantidad de palas se modificó la relación entre diámetro de álabes y diámetro de la turbina, dando como resultado las geometrías que se observan en la figura 1.

Modelo computacional

Las simulaciones se realizaron con un software de cálculo de dinámica de fluidos computacional (conocido por sus siglas en inglés como CFD por computational fluid dynamics) [4] en donde se resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes en el dominio dentro del cual se encuentra la turbina, la cual está sometida a una corriente de aire con una velocidad conocida, y se miden los valores de torque dinámico (con la turbina girando) a distintos ángulos de posición de la misma [1].

El tamaño del dominio computacional fue de aproximadamente 1,5 millones de volúmenes finitos, siendo el tamaño de los elementos ubicados en las cercanías de la turbina del tipo prismático (para copiar la geometría de la mejor manera posible), con un tamaño de 2mm de lado, y el tamaño máximo de los elementos en el dominio (estos del tipo tetraédricos) de 70 mm de lado. Las simulaciones se realizaron teniendo como criterio de convergencia un error RMS (promediado) por debajo de 1×10^{-5} , o al alcanzar 300 iteraciones. Cada simulación requiere un tiempo de cálculo de 2 hs aproximadamente.



Resultados de las simulaciones

Para cada geometría, se realizaron simulaciones a distintas velocidades de giro, ya que cada una de ellas tiene el mayor C_p a un TSR distinto. Los mejores resultados de coeficiente de potencia para cada geometría se encuentran en la Tabla 1.

Geometría	Descripción	C_p Óptimo	Lambda Óptimo
2 palas	Diseño 1	0,082	0,6
2 palas	Diseño 2	0,144	0,6
4 palas	Diseño 3	0,188	0,5
4 palas	Diseño 4	0,180	0,5
4 palas	Diseño 5	0,100	0,4
8 palas	Diseño 6	0,208	0,4
8 palas	Diseño 7	0,215	0,4
8 palas	Diseño 8	0,162	0,4

Tabla 1: Resultados de las simulaciones.

En la figura 2 se muestra la variación del torque para modelos de 2, 4 y 8 palas, seleccionando dentro de cada una, la de mejor rendimiento. La velocidad de viento incidente utilizada en las simulaciones es de 5 m/s y las dimensiones de las turbinas son 1,6 m de diámetro por 2 m de alto.

Se concluye que a mayor cantidad de palas aumenta el rendimiento aerodinámico, el torque en la turbina tiene mayor frecuencia pero menor amplitud, y la relación de velocidades optima disminuye. En base a este estudio se optó por realizar la geometría de ocho palas.

Elección de escala

Para seleccionar el tamaño final del prototipo, se tuvieron en cuenta varios factores, dentro de los cuales podemos mencionar el lugar de emplazamiento, el proceso de montaje, método de fabricación y potencia generada.

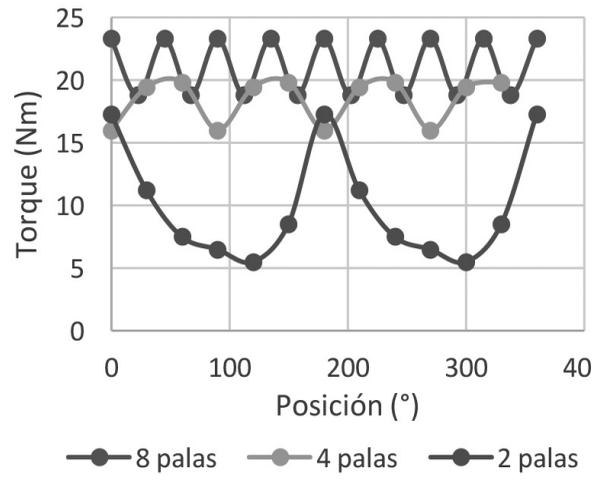


Fig. 2: Comparación de valores de torque vs. posición para cada geometría.

Al ser el lugar de emplazamiento la torre administrativa de la Facultad Regional Santa Fe, se tuvo en cuenta que todas las partes componentes y piezas de la turbina puedan ser transportadas al lugar, y quepan por las puertas de acceso a la terraza. De esta forma el diámetro de las tapas de la turbina no debe ser mayor que la diagonal de las puertas.

Las dimensiones finales son de 2 metros de diámetro y 2,5 metros de altura, siendo la última medida consecuencia de mantener la relación de aspecto con la geometría utilizada en los estudios.

DISEÑO MECÁNICO DEL AEROGENERADOR

Partes y componentes

En la figura 3 se muestra un esquema con los componentes estructurales de la máquina, los cuales se encuentran distribuidos en tres grupos principales:

1. La turbina propiamente dicha, fabricada en fibra de vidrio con refuerzos de acero en las tapas.
2. La estructura soporte, compuesta por perfiles ángulo, y un travesaño herradura de caño cuadrado estructural.
3. Cuña vínculo de la estructura que soporta la turbina con la losa del techo de la torre de emplazamiento, también compuesta de perfiles ángulos.

Verificación de las partes componentes

Utilizando el reglamento CIRSOC 102/2005 [5], se obtiene la velocidad de viento a la cual se debe verificar la turbina y su estructura completa. Para la condición planteada (lugar geográfico, altura y condiciones del entorno) dicha velocidad es de 183 km/h. Esto da como resultado, una carga transversal equivalente de 1000 kg.

Modelo para simulación por elementos finitos

Para realizar la verificación, se utilizó el complemento Simulation de Solidworks. El modelo se

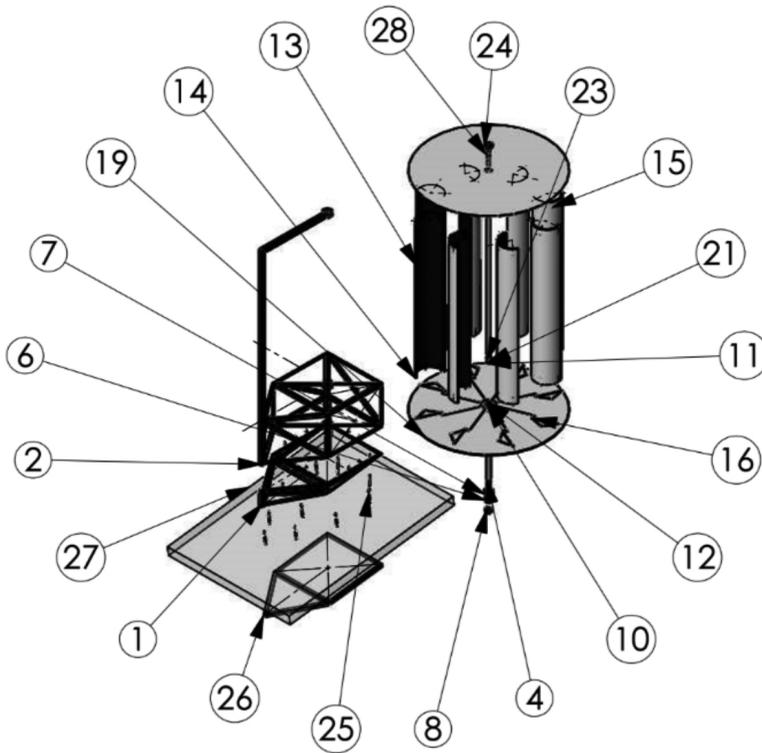
obtuvo unificando todo el diseño de caja, eje, masas, rayos y planchas de apoyo para los álabes, en un solo modelo sólido. Junto con dicho sólido, se utilizaron las tapas superior e inferior, y los álabes, representados en la simulación como elementos de placa. Los componentes mencionados se pueden observar en la figura 4.

La simulación se realizó en estudios no lineales, debido a que la estructura sometida a la carga determinada por norma sufre grandes deformaciones, y en el estudio lineal, los resultados pueden ser exagerados, por no tener en cuenta la variación de la rigidez debida a cambios de forma, o de tensiones cercanas a los límites de fallo de cada material sometido a deformaciones importantes.

El modelo de elementos finitos logrados es mixto (cuenta con elementos de placa en las tapas y álabes, y elementos sólidos tetraédricos en la estructura que representa los ejes y caja soporte de la turbina). La malla es conformada por 932.676 elementos, y tiene 1.928.300 nodos, donde el tamaño global del elemento es de 12 mm, utilizándose en la tapa inferior elementos de 10 mm de tamaño, para evitar errores numéricos que deriven en concentración de tensiones.

Se cargan los álabes frontales en la condición más desfavorable, empotrando la base de la estructura, vinculada por uniones abulonadas y soldadas a la cuña, que al mismo tiempo será fijada a la losa por perfiles IPN (doble T) y varillas roscadas con tuercas pesadas. Se puede observar el modelo en la figura 5.

Los resultados obtenidos en la simulación no lineal de Solidworks son los que se aprecian en las figuras 6 y 7, las cuales muestran las deformaciones (exagerada con respecto a la escala real en un factor de 10) y tensiones en la estructura respectivamente.



Item N°	Nombre de la pieza	Cant.
1	Estructura cuña	1
2	Caja metálica	1
3	B18.2.3.2M - Bulon M12 x 1.75 x 30	14
4	Eje inferior	1
5	Brida inferior	1
6	Rodamiento cónico SKF - T2EE 060	1
7	Rodamiento cónico SKF - T7FC 065	1
8	B18.2.4.6M - Tuerca pesada, M56 x 5.5	1
9	B18.2.4.1M - Tuerca M12 x 1.75	14
10	Masa inferior_parte 1	1
11	Masa inferior_parte 2	2
12	Varilla refuerzo 8 mm	8
13	Álabe cubierta	8
14	Álabe Foam	8
15	Esparrago M10 x 130	48
16	Placa apoyo álabes	8
17	Masa superior_parte1	1
18	Varilla refuerzo 6 mm	8
19	Tapa fibra inferior	4
20	B18.2.4.1M - Tuerca M10 x 1.5	3
21	Camisa	1
22	Camisa	1
23	Eje superior	1
24	Rodamiento a bolas SKF - 6409	1
25	Varilla roscada M20X220	10
26	Contrauña	1
27	Losa	1
28	Extension eje superior	1

Fig. 3 Componentes de la turbina.

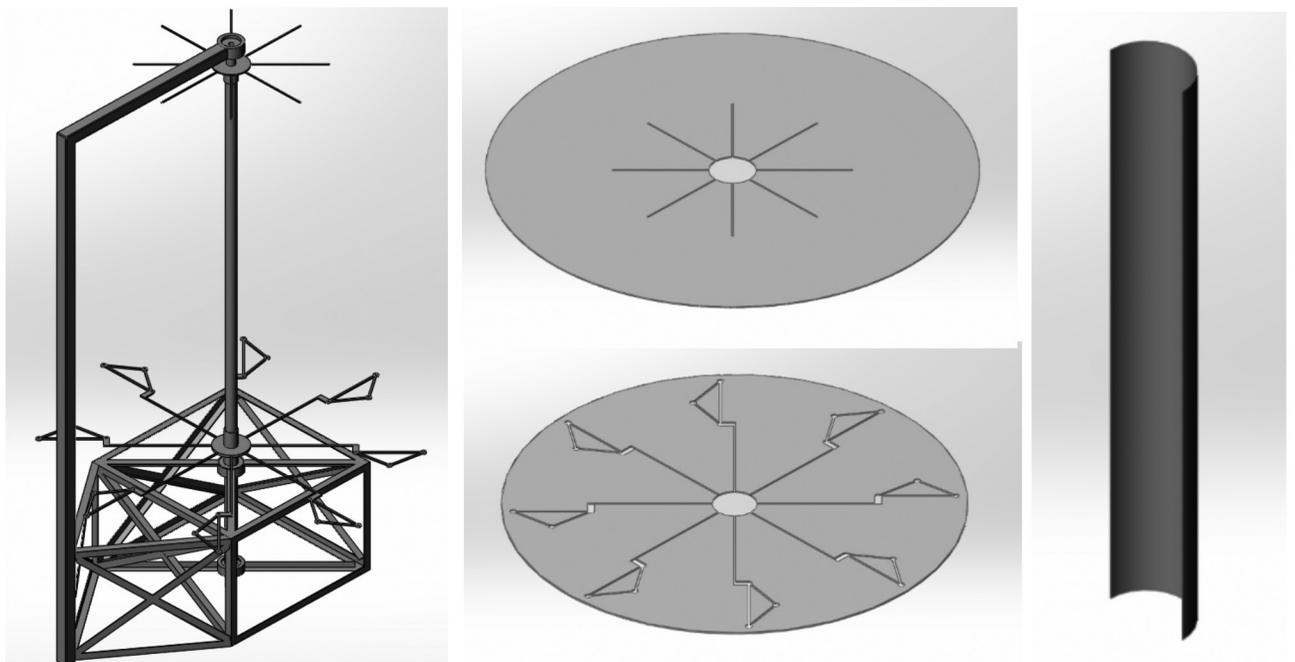


Fig.4: Partes utilizadas en la simulación con Solidworks.

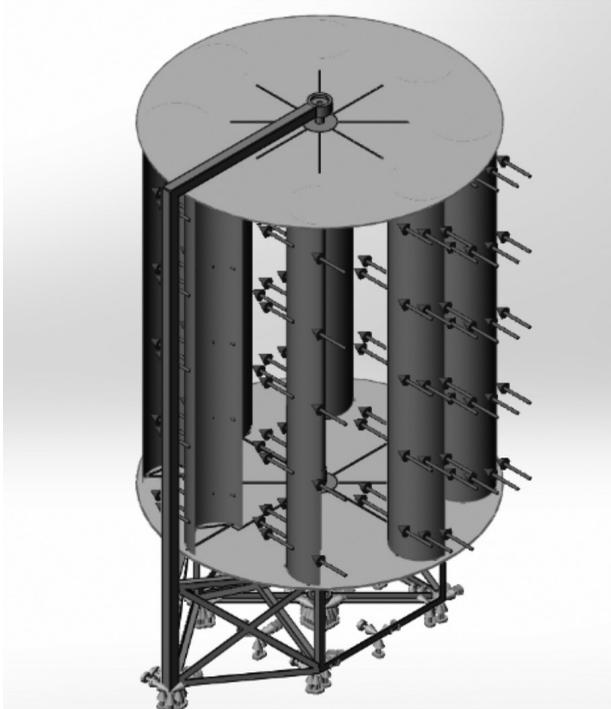


Fig.5: Modelo de Solidworks Simulation con condiciones de borde.



Fig.7: Resultado de tensiones obtenidos de la simulación (Factor: 10).

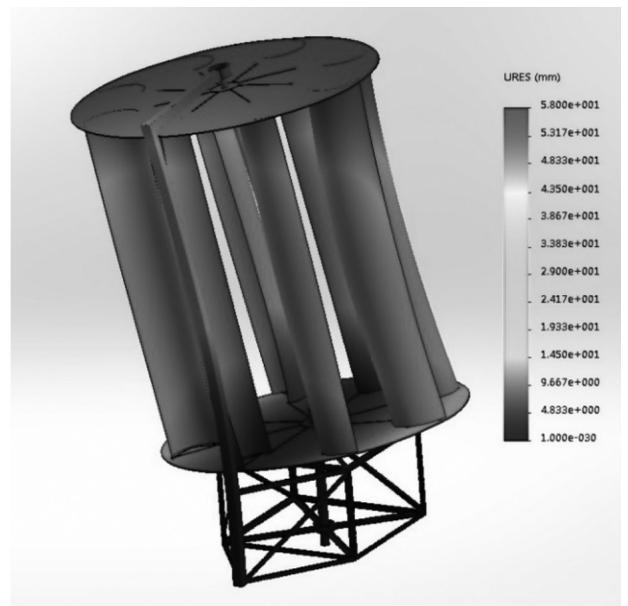
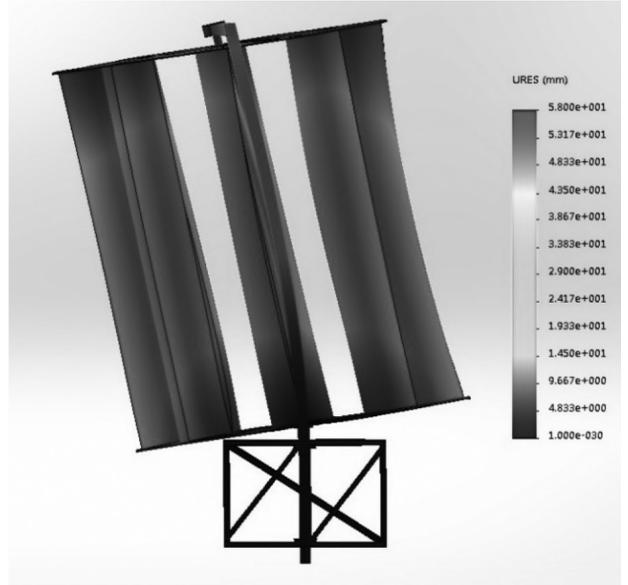


Fig.6: Resultado de desplazamientos obtenidos de la simulación (Factor: 10).

FABRICACIÓN

Actualmente se encuentra en etapa de fabricación, la parte más avanzada es la turbina. En la figura 8 se aprecia el tamaño de los álabes a la izquierda, y a la derecha el proceso de fabricación de la tapa y el lugar de emplazamiento.

En la figura 9 se muestran partes de la maquina en construcción, como el eje inferior con los cubos para el freno (se utiliza un freno de motocicleta) para controlar la velocidad de giro, y la corona dentada para la transmisión. mediante cadena al generador. También se pueden observar los asentamientos de



Fig. 8: Proceso de fabricación y lugar de emplazamiento.



Fig. 9: Componentes y partes en el proceso de construcción y armado.

los rodamientos donde ira apoyado dicho eje y la caja que contendrá y será soporte de la estructura como un avance del proceso de construcción, y la batería a utilizar para retener la carga del generador.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un diseño propio de aerogenerador para la ciudad de Santa Fe, lo cual represento en todas las

etapas del proyecto (investigación, desarrollo, diseño y fabricación.) un desafío de ingeniería multidisciplinario, abarcando tanto el ámbito académico, como el privado.

El proyecto refleja claramente la dificultad de llevar un estudio de investigación y desarrollo a la realidad, no solo por lo complejo del diseño de ingeniería, sino también por factores externos que demandan por parte del diseño mayor necesidad de seguridad y rigor (en este caso, el hecho de emplazar la maquina en la misma

Facultad Regional Santa Fe, en zona urbana), atendiendo a los requisitos impuestos por normas, y por las condiciones impuestas por la estructura existente.

Como trabajo futuro se verificará el funcionamiento de la turbina, para comparar con los obtenidos en simulaciones.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), y a la Fundación NBSF.

REFERENCIAS

[1] Tacca E., Spies L. (2015) Estudio aerodinámico de turbinas eólicas Savonius mediante simulación computacional. *JIT 2015, Venado Tuerto.*

[2] Boyle G. (2006) *Renewable Energy; Power for a sustainable future.* Oxford.

[3] Hau E. (2005) *Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* Springer. [4] Fox R. (1992), McDonald A. *Introduction to Fluid Mechanics 4th ed.*, John Wiley & Sons, Nueva York. [5] CIRSOC 102. (2005) *Acción del viento sobre las construcciones.* INTI.