

Diseño de generador eólico de baja potencia con materiales reciclados

Silvio Colombo, Martín Flores, Gonzalo Galarraga,
Nicolás Mesiti y Carlos Muñoz

Resumen

La creciente demanda de energía eléctrica a nivel global, como así también los avances en relación al cuidado del medio ambiente nos obligan a desarrollar nuevas tecnologías de generación cada vez más eficientes y al mismo tiempo con menor impacto ambiental. Es por eso que, para satisfacer estas demandas, resulta necesario un cambio de paradigma en los sistemas de generación de energía, dejando de lado por ejemplo el empleo de combustibles fósiles (con su conocido impacto) como materia prima para dicha generación y migrar al aprovechamiento de recursos naturales renovables como la energía solar, eólica y mareomotiz entre otras.

Debido a esto se plantea el diseño de un sistema modular de generación de energía eólica de eje vertical y baja potencia, eficiente y sustentable.

El diseño de las aspas tiene como objetivo mejorar el aprovechamiento de la corriente de viento, como así también la implementación de materiales reciclados para su producción.

El alcance del presente abarca el diseño y evaluación de comportamiento mecánico de distintos modelos de aspas, a fin de lograr la eficiencia buscada. Al mismo tiempo, se realizó el estudio de factibilidad técnica en función de las propiedades físicas, mecánicas y de conformado de diversos materiales de origen reciclable para su empleo en la fabricación de dichas aspas, para esto, se efectuaron las simulaciones por elementos finitos en cada uno de los diseños de aspas, variando el material a utilizar y analizando las ventajas y desventajas en cada caso.

La incorporación de la metodología de simulaciones por elementos finitos, permite el ahorro de tiempo de ensayos de campo, como así también el ahorro de materiales para prueba.

De este modo, con los resultados obtenidos de las simulaciones, se plantea una solución integral, eficiente desde el punto de vista energético y sustentable en cuanto a materiales empleados.

Objetivo

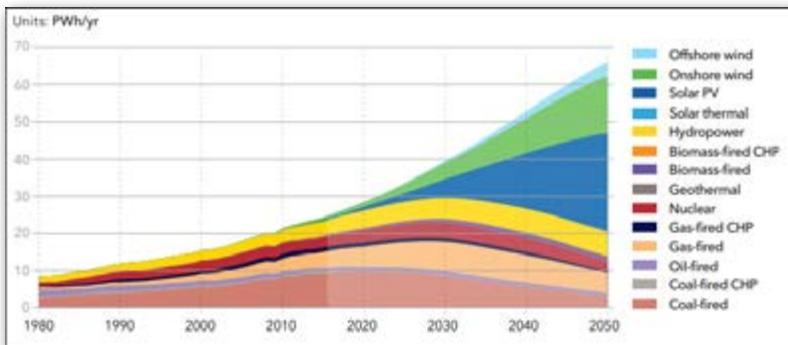
Diseñar un sistema modular de generación de energía eólica de eje vertical y baja potencia, eficiente y sustentable.

Identificar y testear, a través de un prototipo piloto, toda información técnica necesaria para optimizar el proceso de obtención de energía limpia, a través de la correcta selección del diseño de aspas y los materiales reciclados empleados para su construcción.

Justificación

La creciente demanda de energía eléctrica a nivel global, como así también los avances en relación al cuidado del medio ambiente nos obligan a desarrollar nuevas tecnologías de generación cada vez más eficientes y al mismo tiempo con menor impacto ambiental. Es por eso que, para satisfacer estas demandas, resulta necesario un cambio de paradigma en los sistemas de generación de energía, dejando de lado por ejemplo el empleo de combustibles fósiles (con su conocido impacto) como materia prima para dicha generación y migrar al aprovechamiento de recursos naturales renovables como la energía solar, eólica y mareomotriz entre otras.

Se espera que para el año 2050, el 80% de la energía eléctrica generada a nivel mundial provenga de fuentes renovables, alrededor de un 40% provendrá de la fotovoltaica, mientras que la energía eólica, tanto terrestre como marítima, generarán un 30% del total (Fig.1). Los combustibles fósiles tendrán un pico de demanda hasta el año 2030 y luego comenzarán a decaer, no solo por la imposición de las energías renovables y la concientización por el cuidado del medioambiente sino también por nuevos estándares de eficiencia energética.



1 - Generación mundial de electricidad por tipo de central eléctrica

Otro de los puntos importantes que persigue este proyecto es el de la utilización de materiales reciclados y recuperados para el conformado de las palas, especialmente polímeros de consumo masivo que son muy fáciles de encontrar y cuya cultura de separación y reciclado no está todavía firmemente arraigada en la sociedad.

Con el fin de crear el prototipo de un Sistema de generación de Energía Eólica de uso hogareño ajustable a las necesidades del usuario, que no perturbe la visual, sea accesible y de fácil instalación, se diseñó un sistema modular interconectado capaz de generar un máximo de 900 W de potencia, donde se emplearán 3 módulos de 300 W cada uno.



2 - Prototipo piloto en testeo V1

Alcance

Abarcaremos desde el diseño y evaluación del comportamiento fluido-mecánico de los distintos modelos de aspas, a fin de lograr la eficiencia buscada, como así también un estudio de factibilidad técnica en función de las propiedades físicas, mecánicas y de conformado de diversos materiales de origen reciclable para su empleo en la fabricación de dichas aspas. Para esto, se efectuaron diversos modelos matemáticos de simulación por elementos finitos donde se fueron variando los materiales a utilizar, analizando las ventajas y desventajas en cada caso, y las diferentes alturas que simulan la mejor ubicación respecto de las condiciones mínimas y necesarias de viento.

La incorporación de la metodología de simulaciones por elementos finitos, permite el ahorro de tiempo de ensayos de campo, como así también el ahorro de materiales para pruebas. De este modo, con los resultados obtenidos de las diferentes corridas de simulación, se plantea una solución integral, eficiente desde el punto de vista energético y sustentable en cuanto a materiales empleados.

Desarrollo del Trabajo

Generador de Eje vertical

Este tipo de aerogeneradores tiene la ventaja de que no necesitan sistemas de orientación. Esto es una gran ventaja, ya que no habría que diseñar ni fabricar estos mecanismos tan complejos de direccionamiento y se eliminarían los esfuerzos a los que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor. Así, por su disposición, hacen posible la colocación de los sistemas de conversión en el suelo, eliminando de esta forma pesadas cargas en las torres, algo que no se puede evitar en los de eje horizontal.

Dentro de los aerogeneradores de eje vertical existen dos diseños básicos: Savonius y Darrieus. El rotor Savonius, presenta sencillez en cuanto a técnicas de fabricación y a su bajo costo, aunque todo ello afecte a su eficiencia, haciendo que ésta no sea muy elevada. Este tipo de rotores suelen utilizarse en aplicaciones donde se requieren pequeñas potencias. En cuanto a los rotores Darrieus cada vez se están desarrollando más para la generación de electricidad, llegando incluso a competir con los de eje horizontal de palas aerodinámicas. Tienen un par de arranque nulo y entregan potencias altas por unidad de peso del rotor y por unidad de costo. La combinación de estos dos diseños de rotores ha dado lugar a un diseño de rotor Savonius con las palas torsionadas, para aumentar así su par de arranque. Este tipo de palas son las que seguirán el desarrollo del informe.



Generador Darrieus



Generador Savonius

Análisis del recurso eólico y dimensionado

Como se especificó anteriormente, se realizará el desarrollo de un sistema modular de generación de 300 W cada uno capaz de ser interconectado. Por lo tanto, debemos obtener las dimensiones de palas capaz de poder absorber esa energía del viento.

Donde la energía cinética del viento es:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

ρ : densidad del aire

A: Superficie considerada

v: Velocidad de viento

La siguiente tabla describe todas las dimensiones aproximadas de las que podemos obtener alrededor de 400W

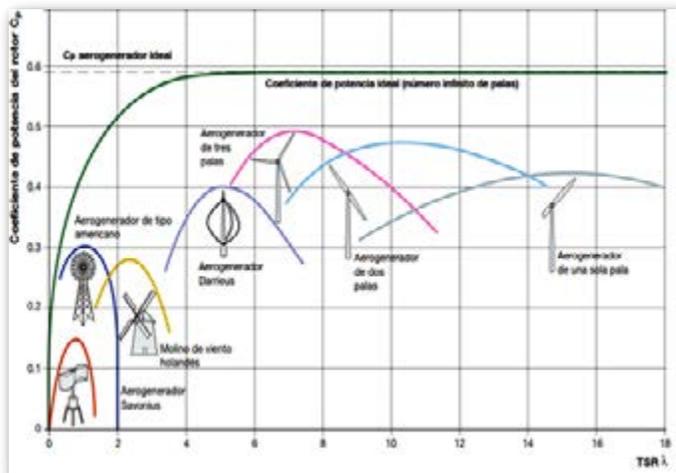
L [m]	ϕ [m]	P [W]	L [m]	ϕ [m]	P [W]	L [m]	ϕ [m]	P [W]	L [m]	ϕ [m]	P [W]
0.5		203.8	0.5		244.6	0.5		285.3	0.5		326.1
0.6		244.6	0.6		293.5	0.6		342.4	0.6		391.3
0.7		285.3	0.7		342.4	0.7		399.5	0.7		456.5
0.8		326.1	0.8		391.3	0.8		456.5	0.8		521.8
0.9		366.9	0.9		440.2	0.9		513.6	0.9		587.0
1.0	0.5	407.6	1.0	0.6	489.1	1.0	0.7	570.7	1.0	0.8	652.2
1.1		448.4	1.1		538.1	1.1		627.7	1.1		717.4
1.2		489.1	1.2		587.0	1.2		684.8	1.2		782.6
1.3		529.9	1.3		635.9	1.3		741.9	1.3		847.8
1.4		570.7	1.4		684.8	1.4		798.9	1.4		913.1
1.5		611.4	1.5		733.7	1.5		856.0	1.5		978.3

L [m]	ϕ [m]	P [W]	L [m]	ϕ [m]	P [W]	L [m]	ϕ [m]	P [W]	L [m]	ϕ [m]	P [W]
0.5	0.9	366.9	0.5	1.0	407.6	0.5	1.1	448.4	0.5	1.2	489.1
0.6		440.2	0.6		489.1	0.6		538.1	0.6		587.0
0.7		513.6	0.7		570.7	0.7		627.7	0.7		684.8
0.8		587.0	0.8		652.2	0.8		717.4	0.8		782.6
0.9		660.3	0.9		733.7	0.9		807.1	0.9		880.5
1.0	733.7	1.0	815.2	1.0	896.8	1.0	978.3	1.0	1076.1		
1.1	807.1	1.1	896.8	1.1	986.4	1.1	1076.1	1.1	1173.9		
1.2	880.5	1.2	978.3	1.2	1076.1	1.2	1165.8	1.2	1271.8		
1.3	953.8	1.3	1059.8	1.3	1141.3	1.3	1255.5	1.3	1369.6		
1.4	1027.2	1.4	1141.3	1.4	1222.9	1.4	1345.1	1.4	1467.4		
1.5	1100.6	1.5	1222.9	1.5		1.5		1.5			

De las dimensiones que presentan se resaltan en la tabla con color, se definió seguir con la primera, diámetro de 500 mm y altura de 1000 mm.

Factor de potencia

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.



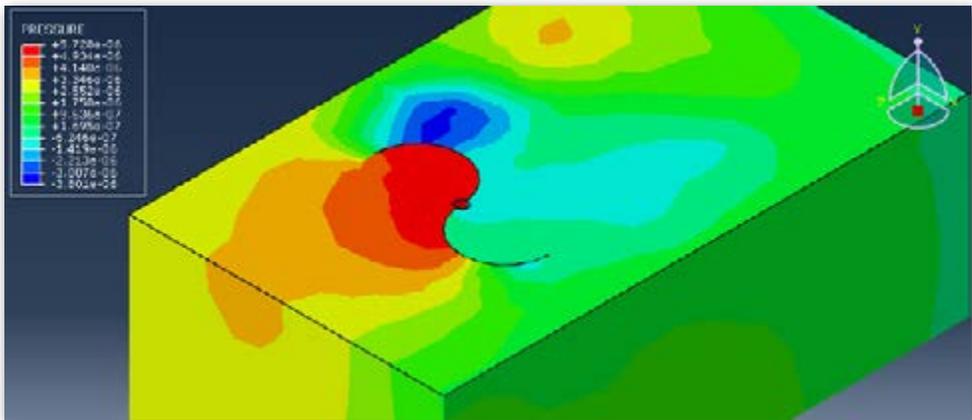
Curvas de factor de potencia para diferentes tipos de generadores.

Simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir como de técnicamente eficiente es un aerogenerador. En otras palabras, tomamos la curva de potencia y la dividimos por el área del rotor para obtener la potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor. Posteriormente, para cada velocidad del viento, dividimos el resultado por la cantidad de potencia en el viento por metro cuadrado.

Como nuestro desarrollo se encuentra en etapa de prototipado no poseemos mediciones *in situ* para poder obtener las curvas de potencia entregada contra la energía del viento, procedemos a estimar de tablas el factor de potencia ($C_p=0.2$) para los restantes cálculos de potencia.

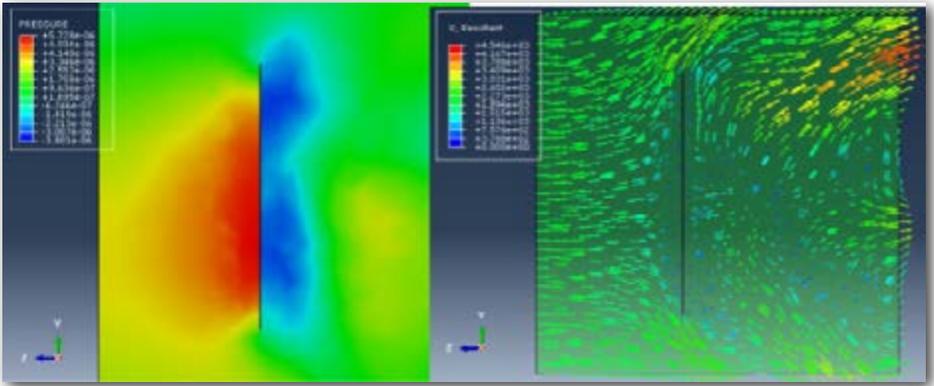
Análisis fluidodinámicos

Como punto de partida para los análisis computacionales se planteo realizar un generador savonius típico, sin torsión, de los cuales obtuvimos gradientes de presión, velocidad, vorticidad, etc.



Presión Dinámica - Generador Tipo Savonius (h=500mm)

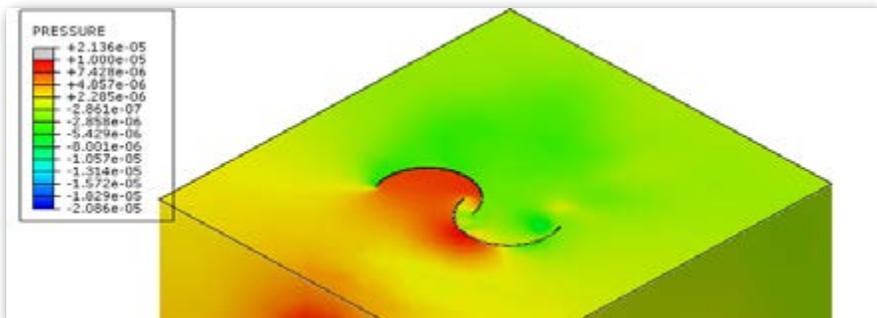
De las palas tipo Savonius se obtiene un resultado esperando, donde se genera una concentración de presión sobre la curvatura cóncava. Como puede verse en la imagen, el fluido alcanza un pico de presión dinámica de 6 Pa para una velocidad de 2m/s en el centro de las palas.



Gradiente de presión dinámica - Esquema vectorial

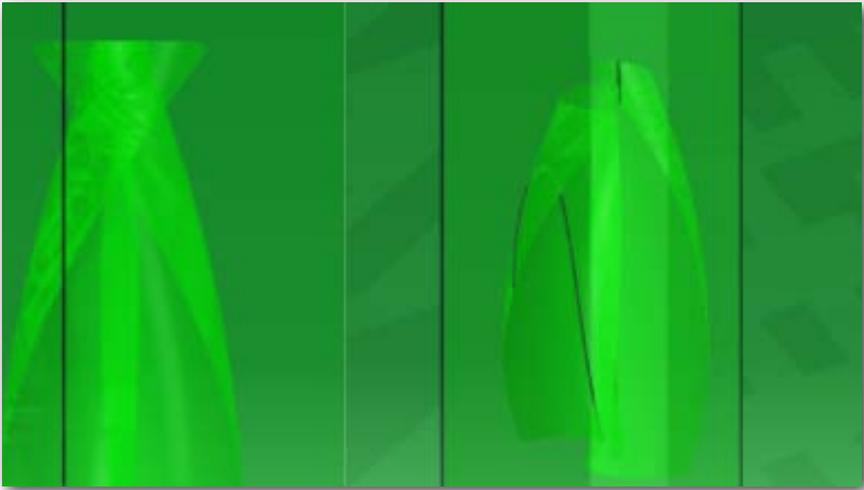
El gradiente de presión que se genera a lo largo de la pala se debe a la variación en la velocidad del fluido, tanto en magnitud como en dirección. En el centro de la pala tenemos la mayor resistencia al flujo, ya que presenta un cambio drástico de dirección, efecto que ocasiona una acción y reacción propia de la segunda ley de Newton en la interacción Pala-Fluido, de ahí que obtenemos nuestro pico de presión. A partir de ahí, los cambios en la dirección del fluido son más graduales como se representan en el mapa vectorial de velocidades en la imagen anterior. Esto provoca una caída en la presión dinámica sobre los extremos de la pala.

Generador tipo ADN:

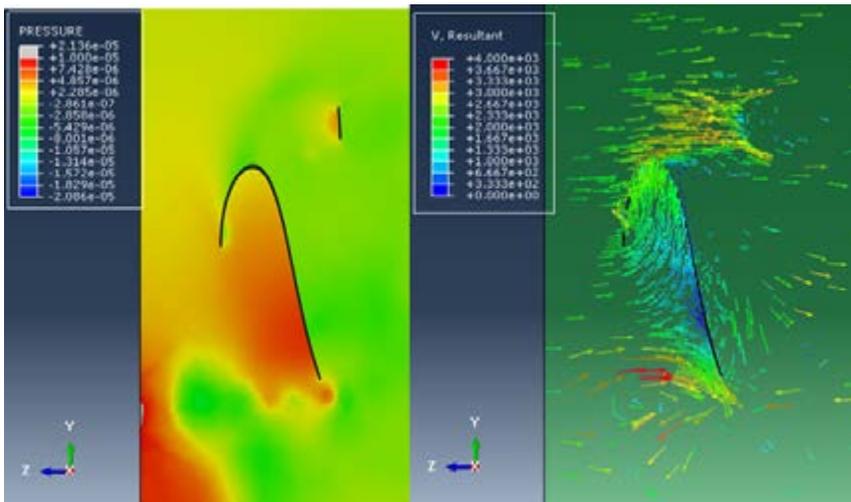


Las palas con forma de ADN a diferencia de lo expuesto anteriormente presentan una doble curvatura, por lo tanto, en todo momento presentara una sección de mayor eficiencia ante cualquier dirección de viento posi-

ble. De aquí que la superficie de pala perpendicular al fluido será menor, pero en este caso, obtenemos un mayor orden magnitud en los índices de presión dinámica. Como puede observarse en la imagen siempre la curvatura cóncava es la que mayor presión obtiene, en este caso, el valor de presión dinámica es aproximadamente de 15 Pa.

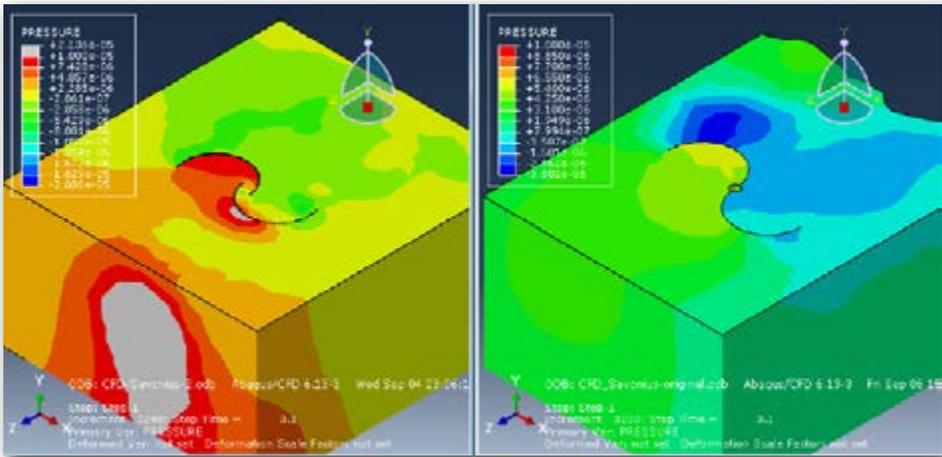


Ubicación de corte Pala ADN



Gradiente de presión dinámica - Esquema vectorial de velocidades

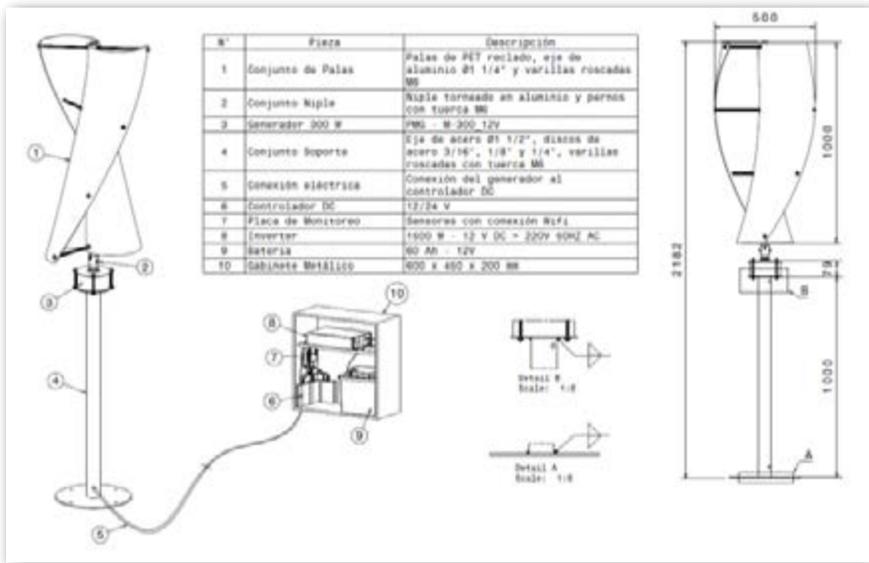
Con este tipo de pala se alcanzan mayores valores de presión debido a que la doble curvatura nos genera un ángulo contrario a la dirección del fluido, por lo tanto, el cambio en la dirección será mayor. Para lograr esto, las palas deben generar una reacción sobre el fluido de mayor impacto a las palas Savonius. Por lo tanto, ante las mismas condiciones (velocidad del fluido) las palas tipo ADN presentan mayor eficiencia.



Comparativa de presión dinámica sobre la sección perpendicular a la dirección del viento

Análisis estructurales:

Antes de comenzar con los análisis estructurales se presentan los componentes requeridos para adaptar las palas tipo ADN a nuestro desarrollo del generador eólico de baja potencia. En el siguiente diagrama se encuentra la lista de componentes requeridos para su posterior prototipado.

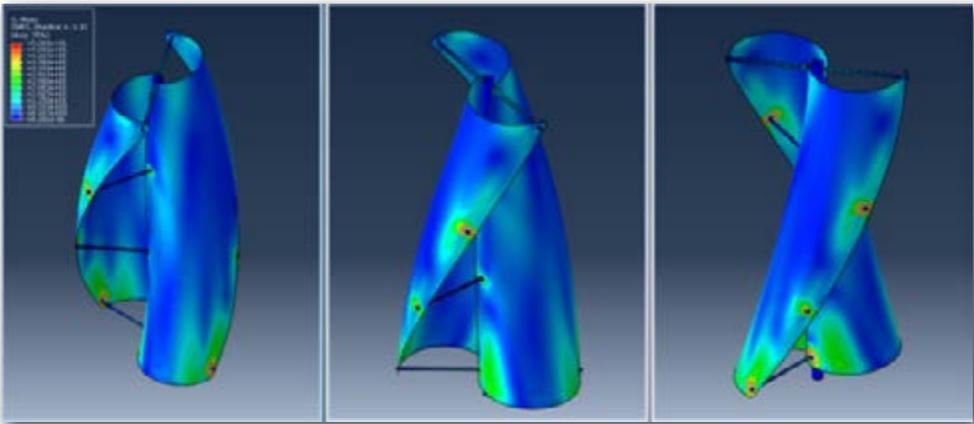


Generador eólico de baja potencia

Para la caracterización de materiales se realizaron dos tipos de simulaciones sobre el generador basadas en las condiciones de trabajo en régimen o sobre su posible bloqueo de giro ante situaciones extremas que pongan en peligro su funcionamiento.

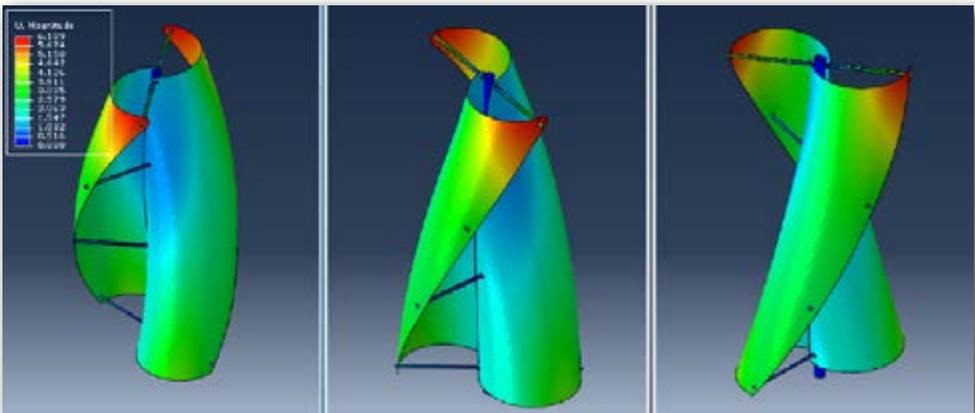
- Caso 1: Análisis en régimen antes cargas producidas por el efecto de las fuerzas centrífugas.
- Caso 2: Análisis en estado de bloqueo ante la acción de viento extremo.

Caso 1: La velocidad de rotación en régimen adoptada es de 400 rpm, donde vamos a poder visualizar el comportamiento estructural de cada componente del sistema.



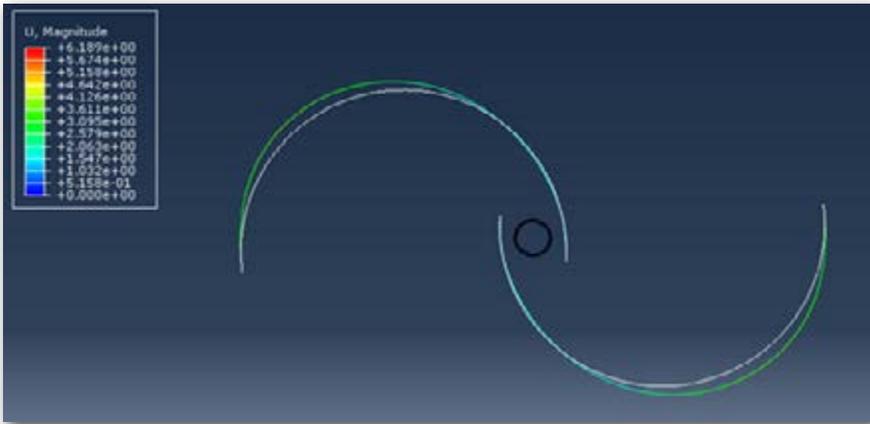
Análisis tensional del sistema antes el esfuerzo de rotación

El anclaje de las palas sobre los largueros soportes presentan concentraciones de tensiones, y hasta en algunos casos llegan a tensiones de plasticidad del PET. Esto representa un punto crítico para el diseño ya que son puntos de riesgo de rotura. Por lo tanto, al momento de la fabricación del prototipo debemos aplicar un refuerzo estructural para aumentar la rigidez de dichas zonas.



Análisis de desplazamientos

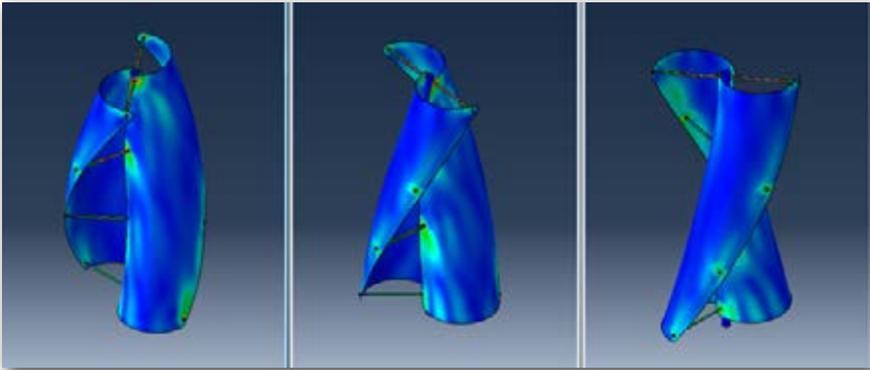
El desplazamiento máximo alcanzado bajo la carga inercial de rotación es de 7 mm, valor que no afecta el funcionamiento del sistema.



Sección inicial vs. sección desplazada bajo carga

Caso 2: Bloqueo de giro

En este caso el análisis se basará en la aplicación de cargas de vientos cuando el generador se encuentra en estado de reposo o frenado mecánicamente. Esta situación es un punto crítico ya que la estructura cobra vital importancia para trasladar las reacciones sobre la base soporte del generador.



Análisis tensional

Los puntos críticos del sistema son similares al caso 1, obteniendo las mismas zonas de concentración de tensiones donde deberemos profundizar nuestros análisis.



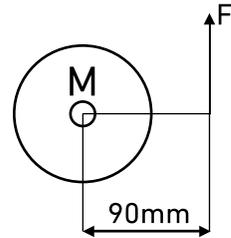
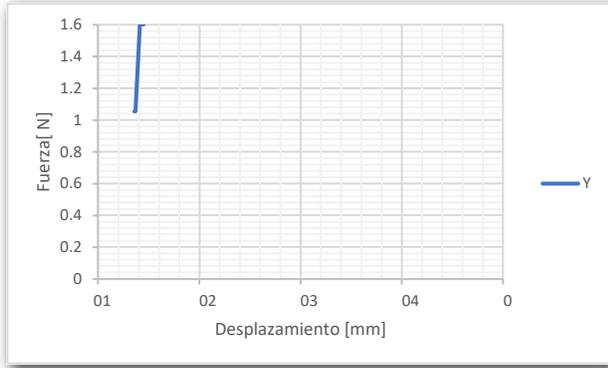
El máximo desplazamiento obtenido en las palas es de 9 mm cambiando la curvatura de la sección. Esta deformación genera mayores esfuerzos sobre las uniones de las palas y los largueros, donde puede producirse la rotura de la pala. Por lo tanto, concluimos con el Caso 1, que se deberá realizar una mejora estructural para aumentar la rigidez de dichos puntos.

Conclusiones

Desde el punto de vista técnico, consideramos que la versión de palas del tipo ADN es la que mejor se presta para el rendimiento en términos de generación de energía y oposición al viento, el prototipo presentado por lo tanto, permite obtener una generación de energía eléctrica considerable para un hogar de consumo promedio.

Respecto de los aspectos sociales, el sistema de aerogeneración hogareño que estamos proponiendo, es un actor protagónico, no solo en la educación para la toma de conciencia acerca de la importancia de las energías renovables, sino que además en el cuidado del medio ambiente por incorporar materiales reciclables de la industria de los alimentos y bebidas.

En el ámbito legal, el proyecto tiene muchas oportunidades de desarrollo, gracias a su potencial de crecimiento de la mano del régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica (Ley. 26190).

Anexo**Velocidad de viento mínima de funcionamiento**

Torque máximo del motor: 0.126Nm

$$Tq = p \cdot A \cdot d \quad Tq = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot A \cdot d}{2}$$

Donde:

p: Presión dinámica

A: Área perpendicular al viento.

ρ : densidad del aire (1.225 kg/m³) v: Velocidad del aire

d: distancia desde el eje del generador al centro de la pala (125 mm)

Velocidad [m/s]	Torque [Nm]
0	0,00
0,5	0,01
1	0,04
1,5	0,09
2	0,15
2,5	0,24
3	0,34
3,5	0,47
4	0,61

Llegando a una velocidad de 2 m/s se genera el torque necesario para vencer la inercia del motor.

Bibliografía

- Asociación Argentina de Energía Eólica: <https://argentinaeolica.org.ar/>
Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 5, No. 5, September 2017: “*Design and analysis of vertical axis wind turbine for household application*”
Y. Tahri “*Study of a Savonius wind turbine performance in a tunnel*”
Det Norske Veritas “*Energy transition outlook*”

Biografía de los autores

Silvio Colombo (Buenos Aires, 1975). Magister de la FIUBA en Dirección Industrial, Ingeniero Industrial de la UTN Facultad Regional Avellaneda. Me desempeño actualmente como Director de Carrera de Ingeniería en Materiales y la Lic. En Desarrollo de Recursos Energéticos de la Universidad Nacional de Avellaneda. Soy docente de Simulación Industrial en la Universidad Tecnológica Nacional donde además soy Investigador categorizado “D” y evaluador de proyectos de Medioambiente, Energías Renovables y Eficiencia Energética. Formo parte de la Comisión Directiva del Instituto Argentino del Envase, donde coordino las Iniciativas Save-Food para la reducción de pérdida y desperdicio de Alimentos y soy miembro representante de la World Packaging Organisation para Argentina, en el área de Sustentabilidad. Me desempeño además como Coordinador del Postgrado y Docente en los módulos de Ecodiseño y Gestión de Proyectos Envases y Embalajes y formo parte activa del Consejo Académico del Postgrado en Tecnologías de Envases y Embalajes de la Universidad Nacional de Rosario y del Instituto Argentino del Envase. Institución de pertenencia: Depto. de Tec. y Admin. - Universidad Nacional de Avellaneda.

Martín Flores (Buenos Aires, 1984) Ingeniero en Materiales de la Universidad Nacional de Avellaneda. Se desempeña actualmente como docente en Proyecto Tecnológico I de la Carrera de Ingeniería en Materiales. Conformo parte del Equipo de Investigación del Departamento de Tecnología y Administración de UNDAV. En lo profesional, se desempeña como auditor especialista en el área de corrosión de la industria naval. Institución de pertenencia: Depto. de Tec. y Admin. - Universidad Nacional de Avellaneda.

Gonzalo Galarraga (Buenos Aires, 1988) Ingeniero Aeronáutico de la Universidad Nacional de la Plata. Se desempeña actualmente como Coordinador del Laboratorio de Diseño y Simulación de Materiales. Conformo parte del Equipo de Investigación del Departamento de Tecnología y Administración de UNDAV. En lo

professional, se desempeña como Analista estructural y Mecánico en la industria aeroespacial (VENG – CONAE). Institución de pertenencia: Depto. de Tec. y Admin. - Universidad Nacional de Avellaneda.

Nicolás Mesiti (Buenos Aires, 1992) Ingeniero en Materiales de la Universidad Nacional de Avellaneda. Se desempeña actualmente como docente en Integridad Estructural y Trazabilidad de Materiales de la Carrera de Ingeniería en Materiales. Conformar parte del Equipo de Investigación del Departamento de Tecnología y Administración de UNDAV. En lo profesional, se desempeña como especialista en el área de corrosión de la petroquímica y energía. Institución de pertenencia: Depto. de Tec. y Admin. - Universidad Nacional de Avellaneda.

Carlos Muñoz (Buenos Aires, 1950) Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica nacional – Facultad Regional Haedo. Se desempeña actualmente como docente en Tecnología de Unión de Materiales de la Carrera de Ingeniería en Materiales. Conformar parte del Equipo de Investigación del Departamento de Tecnología y Administración de UNDAV. En lo profesional, tiene más de 40 años de experiencia en tecnologías de la soldadura y biomateriales en el área de la energía nuclear (CNEA). Institución de pertenencia: Depto. de Tec. y Admin. - Universidad Nacional de Avellaneda.