



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Mecánica Aplicada

Trabajo de Diploma

Título: Propuesta de diseño de la pala de un aerogenerador de baja potencia tipo mini.

AUTOR: Adrian J. Montero Rodríguez

*TUTOR: MSc. Ing. Pavel Michel Almaguer Zaldívar, P.
Auxiliar*

Holguín, 2015

RESUMEN

Dentro de las posibilidades energéticas y medioambientales de las distintas energías renovables, la eólica por su carácter limpio e inagotable, permite un gran desarrollo como recurso endógeno en aquellas áreas que cuentan con potencial para su explotación. En esta investigación se presentan los resultados de los análisis realizados en cuatro posiciones diferentes a la pala de un aerogenerador tipo mini, con el propósito de determinar el estado tensional-deformacional del mismo en condiciones de trabajo. Para ello se le realizaron estudios estáticos, mediante el método de los elementos finitos. Se obtuvo la distribución de las tensiones de Von Mises, además de las deformaciones y los desplazamientos longitudinales. Todo esto permite evaluar el comportamiento mecánico de la pala solicitada por cargas de viento y por la acción de su peso propio.

Summary.

Inside the energy and environmental possibilities of the different renewable energy, the eólic one for their clean and inexhaustible character, allows a great development as endogenous resource in those areas that have potential for their exploitation. In this investigation the results of the analyses are presented carried out in four positions different to the shovel of an aerogenerator type mini, with the purpose of determining the state tensional-deformacional of the same one under work conditions. For they were carried out it static studies, by means of the method of the finite elements. The distribution of the tensions of Von Mises was obtained, besides the deformations and the longitudinal displacements. All this allows to evaluate the mechanical behavior of the shovel requested by loads of wind and for the action of their own weight.

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.....	5
1.1 Parques eólicos.	6
1.1.2 Prospección eólica en Cuba.	7
1.2 Condiciones del lugar.	10
1.3 Aerogeneradores.....	13
1.3.1 Partes fundamentales:.....	15
1.3.2 Distribución de los aerogeneradores en un parque eólico.	18
1.4 Mini-aerogeneradores	23
1.5 – Vinculación de la tecnología CAD/CAM con el diseño de los aerogeneradores	24
1.6.1. Papel del análisis con el MEF en el diseño de las paletas de un aerogenerador.....	24
CAPÍTULO II: MODELACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA PALA DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA TIPO MINI.....	26
2.1 Análisis con el empleo del software SolidWorks/Simulation.	26
2.2 - Descripción funcional de la pala.....	28
2.2.1 Propiedades mecánicas de la pala.....	28
2.3- Aplicación de las restricciones y mallado.	29
2.4 Aplicación de las cargas a la pala.....	30
2.5 Análisis de los resultados.	32
2.5.1 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 90⁰ de giro.	32
2.5.2 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 180⁰ de giro.	33
2.5.3 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 270⁰ de giro.	34
2.5.4 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 360⁰ de giro.	35
2.5.5 Análisis de los desplazamientos en la pala a 90⁰ de giro.....	37

2.5.6 Análisis de los desplazamientos en la pala a 180° de giro.....	38
2.5.7 Análisis de los desplazamientos en la pala a 270° de giro.....	39
2.5.8 Análisis de los desplazamientos en la pala a 360° de giro.....	39
2.5.9 Análisis de las deformaciones en la pala a 90° de giro.	42
2.6 Análisis de las deformaciones en la pala a 180° de giro.	43
2.6.1 Análisis de las deformaciones en la pala a 270° de giro.	44
2.6.2 Análisis de las deformaciones en la pala a 360° de giro.	45
2.7 Comparación de los resultados obtenidos de tensiones, desplazamientos y deformaciones en la pala en las diferentes posiciones de trabajo.....	46
CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES.....	50
BIBLIOGRAFIA	51

INTRODUCCIÓN

Desde ya hace un tiempo se están realizando estudios a nivel mundial sobre el tema de la generación eléctrica renovable en entornos urbanos, fundamentalmente utilizando los paneles solares y los aerogeneradores en sus distintas formas y tamaños. Este último como tema fundamental en este trabajo de investigación.

La energía eólica es la que se obtiene del viento, es decir la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire es transformada en energía eléctrica a través del aerogenerador. (Wind and Solar Power Systems)

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánica, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. A finales de 2014 la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 238 GWh. En ese año la generación eólica generó alrededor del 3% del consumo de electricidad mundial. La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde. Su principal inconveniente es la intermitencia del viento.

Ya en la primera mitad del siglo XX, la generación de energía eléctrica con rotores eólicos fue bastante popular en casas aisladas situadas en zonas rurales.

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

La energía eólica es la energía que se puede lograr del movimiento que produce el viento al interaccionar con las palas de un aerogenerador. Esta energía, que sigue en proceso de desarrollo, nace como respuesta a una mayor demanda del consumo energético, la necesidad de garantizar la continuidad del suministro en zonas importadoras netas de recursos energéticos y de la búsqueda de la sostenibilidad en el uso de los recursos.

En general las mejores zonas de vientos se encuentran en la costa, debido a las corrientes térmicas entre el mar y la tierra; las grandes llanuras continentales, por razones parecidas; y las zonas montañosas, donde se producen efectos de aceleración local.

Antecedentes: La generación eléctrica es uno de los renglones fundamentales de cualquier economía, gracias a esta el mundo moderno se mueve, ya sabemos que los combustibles fósiles de la tierra se están agotando y surge la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía como lo es la solar y la energía eólica que son las más importantes, es una estrategia nacional de producción eléctrica que se viene implementando desde hace una década en Cuba. Las universidades son un pilar importante en este sentido, porque constituyen los centros de investigación donde pueden gestarse nuevos proyectos.

De esta manera, entre las líneas de investigación del Centro de estudios CAD/CAM de la Universidad de Holguín se encuentra el diseño de sistemas para el uso y aprovechamiento de las fuentes de energía renovable, entre ellas la eólica. En la cual no se ha realizado ninguna investigación acerca de las aspas de un aerogenerador tipo mini, por lo que se necesita analizar su comportamiento en condiciones de trabajo, presentándose como problema de investigación lo siguiente:

Problema de Investigación: No se han realizado estudios para el diseño de la pala de aerogeneradores tipo mini considerando la presión del fluido mediante los perfiles de presión que se obtienen con la simulación numérica.

Objeto de estudio: Palas de un aerogenerador tipo mini.

Campo de acción: El comportamiento mecánico de las palas de un aerogenerador tipo mini.

Hipótesis: Si se desarrolla la propuesta del diseño de la pala de un aerogenerador de tipo mini y el estudio estático de la misma entonces será posible determinar su comportamiento mecánico para lograr un funcionamiento más eficiente de estos.

Objetivo general: Proponer el diseño de las palas de un aerogenerador de baja potencia mediante la concatenación de la simulación numérica del flujo de viento y de la acción mecánica del mismo.

Tareas de investigación:

- 1-Realizar un estudio bibliográfico para estudiar el estado actual del tema objeto de estudio.
- 2-Investigar sobre la fabricación de las palas de los aerogeneradores y las problemáticas que presentan los mismos.
- 3-Characterizar la función del Método de los Elementos Finitos en el uso de la pala de un aerogenerador tipo mini.
- 4-Realizar la modelación de la pala del aerogenerador tipo mini.
- 5-Realizar el análisis de los resultados de la simulación del comportamiento mecánico de la pala del aerogenerador.

Métodos de investigación:

- Método de modelación:

Método numérico de análisis por elementos finitos y simulación gráfica.

La utilización de paquetes CAD para el análisis de la pala de aerogeneradores tipo mini considerando la presión del fluido mediante los perfiles de presión que se obtienen con la simulación numérica realizados.

- Método histórico – lógico.

Se estudian los antecedentes en el tema teniendo en cuenta las investigaciones preliminares y sus respectivos resultados obtenidos reflejándolo en la bibliografía.

- Criterio de experto.

La programación de consultas con expertos en el tema para una correcta proyección de la investigación al aporte de datos a fin.

- Análisis y Síntesis.

La presente investigación se basa en el método de análisis ya que se estudiarán, revisarán y analizarán bibliografías correspondientes al tema, al igual que el software utilizados de los que se realizará una síntesis para la elaboración del informe técnico correspondiente.

Resultados esperados.

La evaluación del comportamiento mecánico de las palas del aerogenerador considerando la distribución de presión por la acción del viento obtenida mediante la simulación numérica como cargas mecánicas.

CAPITULO I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.

Cualquier actividad en la sociedad moderna está unida a sistemas energéticos que aseguren un suministro estable y seguro de energía. Los sistemas energéticos empleados hoy en día están basados en recursos naturales que se pueden obtener a costos no excesivos, que se pueden transportar fácilmente y que poseen una adecuada calidad de la energía contenida en el recurso. Estos tres elementos permiten aplicarlos a las máquinas transformadoras de energía con suficiente facilidad y viabilidad.

A lo largo de la historia el hombre ha usado sistemas energéticos que han permitido una adecuada disponibilidad técnica y una viabilidad económica aceptable. A esto se le han agregado en los últimos años los impactos ambientales que su uso puede provocar y que a la larga pueden decidir si un sistema energético es aceptado o rechazado. En estos momentos esto último ha alcanzado una magnitud tal que no existe un proyecto de un sistema energético en el cual no se evalúen y comparen las diferentes variantes que puedan aplicarse en el caso estudiado.

La producción de energía en cualquier sistema energético pasa por diferentes fases que van desde la extracción de la materia prima hasta su gestión final que termina siendo un residuo. Los impactos ambientales aparecen en todas las fases del proceso de producción de energía, estas son: extracción de los recursos, preparación de los materiales, transporte, ingeniería civil e instalaciones, producción de energía, generación de corrientes residuales y depósito de los residuos.

En la energía eólica, que es el sistema que aprovecha la energía cinética del viento y la transforma en trabajo mecánico en una máquina eólica, los impactos son mínimos y aparecen en la fase de construcción y explotación. En la etapa de construcción, la necesidad de construir su cimentación y los accesos y obras civiles necesarias tienen un cierto impacto si no se tienen los cuidados suficientes. Sus efectos son mínimos en la atmósfera y el agua. Sus impactos más

significativos aparecen en la etapa de explotación como el impacto visual, ruido y la biodiversidad. La ocupación de tierra no es significativa. El terreno necesario depende de la configuración del parque. Si los aerogeneradores están ubicados en una línea, como en el parque Gibara 1 (ver figura 1), el área necesaria es pequeña. Un parque eólico de 3 hileras con 4 aerogeneradores (3 x 4) de 1,5 MW necesitará 810000 m². Si su configuración es de 2 x 5 son necesarias 47 ha. Como la potencia nominal de ambos parques es de 18 MW se necesitan 4,5 y 2,6 ha/MW cada uno. No obstante, el 99 % del terreno puede utilizarse tal y como antes de instalarse los aerogeneradores por lo que la ocupación del terreno no es elemento preocupante.



Figura 1 Parque eólico de Gibara. Fuente: Tecnologías instaladas en Cuba

1.1 Parques eólicos.

Con este nombre se conoce la instalación conjunta de un determinado número de generadores eólicos que generan electricidad conectados a las redes de suministro, resolviendo dos problemas como son la potencia relativamente baja de los aerogeneradores individuales y su producción intermitente.

Hasta hace unos pocos años, un parque eólico (ver figura 2) estaba constituido por un conjunto de un centenar, o más, de aerogeneradores de potencia entre 25 kW y 50 kW, lo que reducía los gastos de mantenimiento y simplificaba los

requisitos de interconexión de potencia, suavizando y compensando las interrupciones provocadas por las turbulencias y fluctuaciones locales en la velocidad del viento; se estructuraban de forma que, por ejemplo, una instalación con rotores de 12,5 m de diámetro podía comenzar a suministrar energía para velocidades del viento de 4 m/s, llegando a generar una potencia nominal de 30 kW con velocidades del viento del orden de 11 m/s; para velocidades del viento por encima de este valor, podían mantener constante su potencia hasta velocidades de desconexión del orden de 25 m/s.

Actualmente el concepto de parque eólico está asociado a un conjunto de aerogeneradores con potencias individuales del orden de 0,6 MW a 2 MW que suman en total una potencia entre 10 MW y 20 MW. Los problemas tecnológicos que plantean las interconexiones entre los aerogeneradores requieren un estudio completo e individualizado de coordinación económica, meteorológica y social.



Figura 2. Parque eólico. Wikipedia 2013

1.1.2 Prospección eólica en Cuba.

Como parte de la Revolución Energética en Cuba, el Estado orientó a mediados del año 2005 iniciar una campaña de mediciones intensivas de velocidad y dirección del viento en varias zonas del país a fin de completar los estudios de viento anteriores y determinar con mayor exactitud el potencial eólico técnico instalable en Cuba. Hasta esa fecha solo se disponía de mediciones de viento a 20 y 30 m de altura en 22 sitios aislados del país, con períodos de 6 meses a un año, realizadas por EcoSol.Solar S.A., con el apoyo de la ONG CUBASOLAR. Por otro lado, se disponía de un mapa preliminar del potencial eólico de Cuba

estimado a 50 m de altura, elaborado por un colectivo de investigadores del Instituto de Meteorología en el año 1995. Una actualización de este mapa se obtuvo en febrero del 2006 utilizando para ello el modelo de micro escala WAsP, elaborada por el Laboratorio Nacional Riso de Dinamarca, y herramientas de los sistemas de información geográficos. Para la confección de este mapa se utilizaron mediciones trihorarias de velocidad y dirección del viento a 10 m de altura de 49 estaciones meteorológicas de la red nacional, con períodos entre 25 y 35 años de datos.

Con estos antecedentes, se seleccionaron 32 zonas del país, en las que se instalaron 82 mástiles anemométricos, cada uno con 50 m de altura y 3 niveles de medición, 10, 30 y 50 m. En los 3 niveles se colocaron sensores para medir la velocidad del viento, y a 48,5 m se colocó una veleta para medir la dirección del viento. Solo el 6 % de los mástiles (5 en total) tienen alturas inferiores a 50 m, es decir, alcanzan la altura de 30 m. Los datos se promedian cada 10 minutos, y se almacenan en un sistema de captación de datos o "datalogger", y luego se transmiten por vía celular a un centro receptor o computadora central, donde se procesan todos los datos. De las 82 estaciones, hoy están operativas 72 de ellas, y 57 (el 79 %) transmiten a distancia por vía celular. En la Figura 3 puede verse un mapa que muestra las 32 zonas seleccionadas para la prospección eólica, en las que se indican el número de estaciones montadas por zonas.

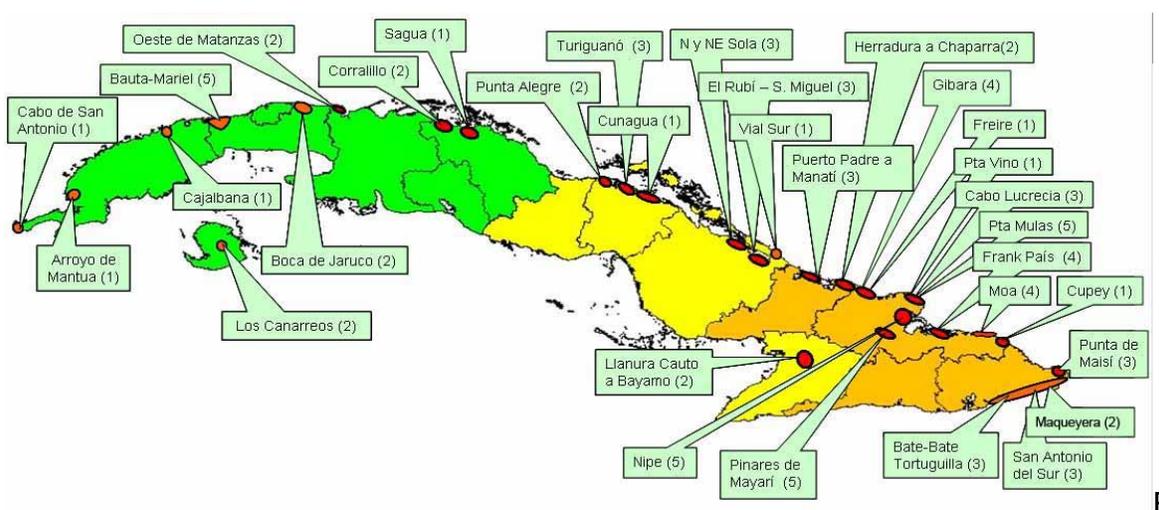


Figura 3. Mapa que muestra las 32 zonas seleccionadas para la prospección eólica.

Fuente: Artículos de energía Eólicas en Cuba

Teniendo en cuenta la velocidad media del viento a 50 m y la densidad de potencia media del viento a esta misma altura, así como los factores de capacidad de tres tipos de turbinas eólicas simuladas cada una para una región del país, se propuso una clasificación del recurso eólico en 4 clases donde se agrupan convenientemente las 32 zonas de prospección eólica. Esta clasificación es mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del recurso eólico. Fuente: El viento en Cuba por Raúl Novo Mesegué

Clase	Clasificación de las zonas	Criterios para la clasificación
A	Buenas para un desarrollo eólico	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad media del viento a 50 m mayor o igual que 6 m/s. • Densidad de potencia media del viento a 50 m mayor o igual que 200 W/m². • Factor de capacidad de la turbina eólica simulada mayor o igual que 25 %. • Período de medición: más de 270 días (9 meses).
B	Posibles por confirmar	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad media del viento a 50 m entre 5,5 y 6 m/s. • Densidad de potencia media del viento a 50 m entre 180 y 200 W/m². • Factor de capacidad de la turbina eólica simulada entre 20 y 25 %. • Período de medición: menos de 270 días (no incluye todos los meses del período poco lluvioso o de mejor viento).

C	Con menos perspectivas (por confirmar)	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad media del viento a 50 m menor que 5,5 m/s. • Densidad de potencia media del viento a 50 m menor que 180 W/m². • Factor de capacidad de la turbina eólica simulada menor que 20 %. • Período de medición: menos de 270 días (no incluye todos los meses del período poco lluvioso o de mejor viento).
D	Que pueden rechazarse (hasta el momento)	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad media del viento a 50 m menor que 5,5 m/s. • Densidad de potencia media del viento a 50 m menor que 180 W/m². • Factor de capacidad de la turbina eólica simulada menor que 20 %. • Período de medición: más de 270 días o año completo.

1.2 Condiciones del lugar.

Las zonas más favorables para la implantación de grandes motores eólicos son las regiones costeras y las grandes estepas, donde vientos constantes soplan regularmente. En general, como la velocidad del viento aumenta con la altura, los emplazamientos más favorables son los cerros y las colinas que dominan un terreno despejado, sin obstáculos que originen turbulencias. Para obtener buenos resultados, es necesaria una velocidad media del viento superior a 30 km/h. Fuente: fuerza 5 en la escala de Beaufort.

Una buena parte de la labor investigadora del aprovechamiento de esta energía es la confección de los mapas eólicos, ya que el potencial energético presenta

grandes irregularidades según las distintas zonas geográficas. Esos mapas son imprescindibles para conocer las zonas más idóneas para la ubicación de este tipo de centrales. Los mapas permiten conocer la velocidad, continuidad y estabilidad del viento para una zona en particular y, especialmente, la densidad de potencia o la máxima potencia que puede obtenerse por unidad de área barrida por el viento. Para el buen funcionamiento de una central es necesaria una densidad de potencia del orden de $1\ 000\ \text{W/m}^2$. fuente: Evento CUJAE 2015.

La mayor dificultad o desventaja para conseguir la energía eólica surge de la variabilidad del viento y del elevado costo de las máquinas para obtenerla, lo que encarece el precio del kWh. Las máquinas para la producción de electricidad a partir del viento son los aerogeneradores, que están constituidos por tres elementos principales: la hélice o rotor; la góndola, en la que se encuentra el generador que transforma la energía cinética transmitida por la hélice en eléctrica; y la torre sobre la que se monta el conjunto de hélices y góndolas. La principal ventaja de esta energía es que constituye una fuente inagotable de energía.

A diferencia de la mayoría de las centrales generadoras, los proyectos de generación eólica son intrusivos respecto al terreno que ocupan en lugar de intensivos. El terreno requerido para un proyecto eólico excede ampliamente la cantidad de terreno requerido por la mayoría de las otras tecnologías energéticas. No obstante mientras un parque eólico puede extenderse sobre un área geográfica y tiene un área delimitada de influencia, el proyecto físico real cubre una porción relativamente pequeña. Un parque de 50 MW, por ejemplo puede ocupar alrededor de $12\ 000\ 000\ \text{m}^2$ pero el monto de terreno realmente ocupado por las turbinas y demás instalaciones pueden ser apenas un 3-5 % de esa área total, dejando el resto disponible para otros usos compatibles.

Las acciones del proyecto que generan mayor número de impactos son las referidas a obra civil: viales, zanjas, edificio de control y subestación. Todas estas acciones causan una alteración del suelo y cubierta vegetal y en ocasiones, pequeñas modificaciones geomorfológicas provocadas por desmontes o aplanamientos. No obstante, en la mayoría de los casos, el acceso principal lo constituyen carreteras ya existentes, mientras que los accesos interiores a las

líneas de aerogeneradores se construyen, en la medida de lo posible, aprovechando el trazado de las pistas forestales y de accesos de uso.

Para asegurarse que los proyectos eólicos son consistentes y compatibles con los usos preestablecidos del terreno, se pueden tomar un amplio rango de acciones. Por ejemplo, cuando un proyecto se ubicará en un área recreacional o con componente paisajístico o cerca de este, algunas agencias establecen requerimientos para “suavizar” la naturaleza industrial del mismo.

Esto incluye:

- Seleccionar el equipamiento con mínimo soporte estructural como cables de fijación.
- Realizar las labores de mantenimiento fuera del área.
- Realizar la colección eléctrica de forma soterrada.
- Ubicar los componentes de los aerogeneradores dentro de la torre o el nacelle.
- Utilizar turbinas más eficientes y grandes para minimizar el número de estas.
- Realizar un correcto espaciamiento para reducir la densidad de máquinas y evitar la apariencia de “muros de viento”
- Utilizar técnicas de construcción y mantenimiento sin carreteras para reducir temporal y permanentemente la pérdida de tierra.
- Restringir el paso de vehículos por las vías existentes.
- Limitar el número de vías de acceso y el ancho de estas.

Para determinar donde aplicar estas estrategias de mitigación para un proyecto, se deben considerar los costos asociados con una estrategia propuesta, el tipo y nivel de impacto, cuan razonable son las acciones a tomar los objetivos de uso del terreno por la comunidad y las alternativas disponibles.

Muchas de estas técnicas han sido tomadas en países europeos. Los proyectos eólicos en Europa son localizados frecuentemente en áreas rurales y agrícolas pero estos tienden a ser unidades sencillas dispersas o grupos más bien pequeños. En varios países, los aerogeneradores han sido ubicados en diques, a lo largo de zonas costeras o mar adentro.

1.3 Aerogeneradores.

En la actualidad existe toda una enorme variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como por el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica (aisladamente o en conexión directa con la red de distribución convencional). Pueden clasificarse, pues, atendiendo a distintos criterios: (Fuente Energía Eólica y Aerogeneradores)

1) Por la posición del aerogenerador:

✓ Eje Vertical

Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. Son también llamados "VAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "vertical axis wind turbines". Existen tres tipos de estos aerogeneradores:

a.1) Darrieus: Consisten en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.

a.2) Panemonas: Cuatro o más semicírculos unidos al eje central. Su rendimiento es bajo.

a.3) Sabonius: Dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente.

✓ Eje horizontal

Son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. Se los denomina también "HAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "horizontal axis wind turbines". Un prototipo de potencia generada 1'5 Mw. Se presenta en la figura.

2) Por la posición del equipo con respecto al viento:

a) A barlovento: Las máquinas corrientes arriba tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de los diseños corriente arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre. Con mucho la mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño.

Por otro lado, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente.

El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre. Además una máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento.

b) A sotavento: Las máquinas corrientes abajo tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre.

La ventaja teórica que tienen es que pueden ser contruidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente.

Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva.

Un aspecto más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que quitarán parte de la carga a la torre. El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba.

3) Por el número de palas:

a) Una pala:

Al tener sólo una pala estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación.

b) Dos palas:

Los diseños bipala de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro

para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.

c) Tres palas

La mayoría de los aerogeneradores modernos tienen este diseño, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño.

d) Multipalas

Con un número superior de palas o multipalas. Se trata del llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras de aquel continente.

4) Por la manera de adecuar la orientación del equipo a la dirección del viento en cada momento:

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento. Se dice que la turbina tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento.

1.3.1 Partes fundamentales:

1. Palas del aerogenerador.

Las palas están fabricadas con una nueva generación de telas de fibra de vidrio, combinadas según estructura. Y recubiertas por un compuesto especial de resinas e-epoxi.

Pesan menos de la mitad que las normalmente utilizadas y con una resistencia mecánica superior. Esto se consigue porque para la fabricación de las palas utilizamos la tecnología más avanzada que se usa en las grandes turbinas. Las palas son capaces de aguantar los vientos más fuertes en cualquier situación climatológica. Presentan un comportamiento excelente frente a cargas de tracción y de fatiga, y un equilibrio óptimo reduciendo al mínimo el empuje horizontal.

El diseño especial de las mismas está optimizado en conjunto con el paso variable para un bajo nivel de ruido. El conjunto resultante es una pala con un óptimo perfil aerodinámico que ofrece una gran dureza con un mínimo peso.

2. Paso variable de palas.

El sistema de paso variable, es un sistema patentado que permite controlar de forma analógica el ángulo de inclinación del borde de ataque de las palas, en función de la incidencia con el viento. Este sistema que cuenta con una serie de mejoras como:

- Aleación anticorrosiva
- Pistón Hidráulico de retorno
- Regulador de presión
- Sincronización a la micra del conjunto de palas

Todo ello permite que el aerogenerador se desacelere en caso de altas velocidades de viento y evite que se produzcan sobre-intensidades que perjudiquen tanto al generador como a la electrónica del conjunto.

Este sistema utiliza la fuerza centrífuga producido por el giro del aerogenerador para cambiar al ángulo de ataque de las palas.

Gracias a la sencillez de funcionamiento y a la incorporación de este sistema conseguimos obtener el máximo resultado energético incluso en las peores condiciones meteorológicas.

3. Generador

Cuenta con un fácil arranque sin ofrecer resistencia, lo que permite que a una velocidad de viento muy baja el aerogenerador produzca electricidad.

Esta lenta velocidad de rotación, disminuye considerablemente las cargas mecánicas y las emisiones de ruido.

Fabricado con materiales especiales para la disipación del calor, consiguiendo un nivel bajo de calentamiento.

Materiales anticorrosivos y anti oxidación, bloque sellado sin efectos de salinidad, ni humedad en instalaciones próximas a las costas.

Imanes de Neodimio encapsulados en el rotor y atornillados.

Curva de potencia optimizada a bajas revoluciones consiguiendo sacar la máxima eficiencia en cualquier circunstancia.

4. Timón de orientación

El timón de orientación de este modelo está diseñado con la misma tecnología utilizada en las palas, adaptada para la cola de orientación. Se trata de un núcleo de acero cubierto de espuma de poliuretano de alta densidad y cubierta por diferentes telas de fibra de vidrio, todo el conjunto se sella con resinas epoxi, para darle mucha dureza a la vez que flexibilidad.

Esta tecnología es la que habitualmente se usa en la industria náutica y aeroespacial, permitiendo al aerogenerador aprovechar los cambios de dirección del viento de forma rápida y eficiente con tal de minimizar las pérdidas ocasionadas por las turbulencias.

El material semirrígido, de gran dureza y resistencia a la fatiga con un factor de elasticidad que le permite absorber las vibraciones, producidas por los rápidos cambios de orientación del viento y adaptarse con suavidad a cada nueva dirección.

5. Cuerpo

Pieza inyectada de aluminio, que proporciona gran robustez a un peso mínimo.

Las juntas teóricas de unión entre los diferentes componentes del aerogenerador producen un efecto de sellado hermético, lo que garantiza una vida larga del conjunto con un gran comportamiento en condiciones meteorológicas adversas.

El cuerpo es donde se disponen las escobillas de conexión por lo que el espacio se ha diseñado con gran capacidad para poder facilitar la entrada de herramientas y otros mecanismos pensando en futuros mantenimientos o recambios de la máquina.

Dispone de una amplia puerta lateral de acceso a los mecanismos internos a cada lado, con dicha doble abertura lateral se facilitan los mantenimientos.

6. Regulador

Uno de los principales elementos del sistema es la electrónica responsable del frenado y la carga de baterías. Nuestros aerogeneradores van equipados con un regulador electrónico para la carga de baterías con 7 diferentes algoritmos configurables, con la intención de garantizar la máxima vida útil de las mismas.

Este regulador de carga electrónico, funciona por medio de filtros PWM haciendo microimpulsos de derivación a resistencias y desviando partes proporcionales de energía a resistencias y batería en función de la capacidad de absorción de la batería configurada y la generación eólica. Esta división de energía entre la batería y las resistencias de frenado además de optimizar las baterías, controla la velocidad del aerogenerador ya que los microimpulsos a resistencias, provocan una inducción electromagnética controlada, lo cual reduce las revoluciones hasta provocar el frenado.

1.3.2 Distribución de los aerogeneradores en un parque eólico.

Si bien los primeros aerogeneradores eran de pequeño tamaño, en la medida que se fueron desarrollando y dada la necesidad de generación eólica a gran escala, la potencia de los aerogeneradores fue aumentando hasta alcanzar los MW. Evidentemente, el almacenamiento de la energía constituyó desde los inicios de la generación a gran escala el principal limitante por lo que la generación conectada a la red eléctrica ha logrado una mayor diversificación y se ha impuesto. La generación conectada a la red eléctrica se puede realizar de dos formas.

La primera es la generación con un aerogenerador individual. En este caso un usuario de la red eléctrica instala en su propiedad un aerogenerador. El objetivo principal es satisfacer su demanda y en segundo lugar, cuando se produce electricidad en exceso con respecto a las necesidades del propietario, este vende la energía a la red eléctrica. En este caso se instalan metros contadores que miden en ambos sentidos. Esta forma de producción de electricidad con energía eólica ha sido muy empleada en Dinamarca, la cual fue estimulada con leyes establecidas al respecto y ha permitido el alto desarrollo de esta fuente en este país. Es claro que esta solución no excede la potencia de 1 MW.

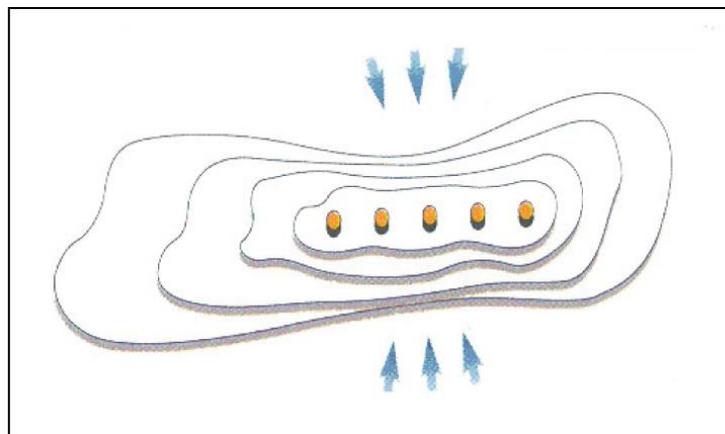
Cuando el objetivo alcanza varios MW, ya no se trata de usuarios independientes si no empresas productoras de electricidad que se conectan a la red eléctrica mediante transformadores o subestaciones de transformadores que alimentan líneas de media o alta tensión.

Como las turbinas eólicas tienen una potencia limitada, llegando en estos momentos a los 5-6 MW, se recurrió a la agrupación de aerogeneradores

conocidas como *parques eólicos o granjas eólicas* que en esencia son un cierto número de aerogeneradores con una determinada distribución interconectados entre si y conectados a la vez a subestaciones transformadoras que se conectan a la red. Dicho de otra forma, un parque eólico conectado a la red se configura mediante la instalación integrada de un conjunto de varios aerogeneradores, interconectados eléctricamente mediante redes eléctricas propias, compartiendo una misma infraestructura de accesos y control. La conexión a la red eléctrica de distribución se realiza mediante la correspondiente transformación de tensión, dependiendo de la capacidad técnica de las redes existentes y de la propia instalación.

Al determinar la configuración de un parque eólico, es decir, la distribución de los aerogeneradores sobre el terreno, deben tenerse en cuenta tanto los aspectos puramente del viento, como velocidades medias, direcciones predominantes, rafagosidad, y vientos extremos, así como los aspectos correspondientes al terreno disponible, es decir, la disposición característica de las máquinas y la distancia entre ellas, o características de los propios aerogeneradores como son su tamaño, tipo y altura de la torre.

A continuación se presentan algunas configuraciones típicas de parques eólicos. En la Figura 4 se muestra la configuración típica cuando los aerogeneradores se disponen sobre una elevación. Los círculos indican los aerogeneradores, en tanto que las flechas indican la dirección del viento dominante.



Wikipedia)

Cuando el terreno es llano, y hay una dirección de viento dominante bien definida, los aerogeneradores se suelen disponer en filas alineadas (ver figura 5).

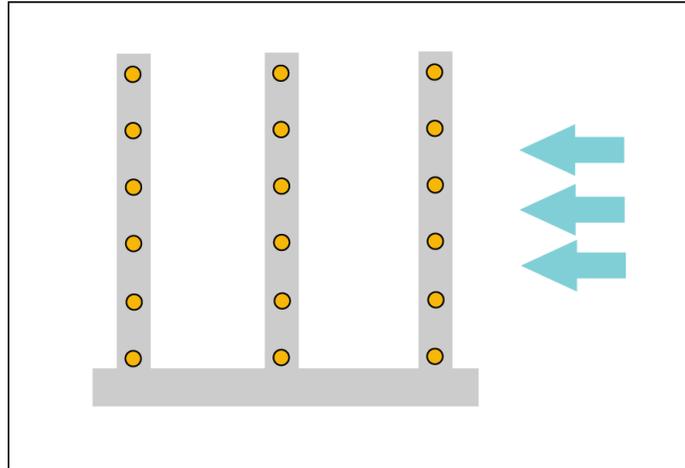


Figura 5. Configuración de un parque eólico en filas alineadas. . (Fuente Wikipedia)

Cuando el terreno es llano, pero el viento presenta frecuentes cambios de dirección, los aerogeneradores se suelen disponer *al tresbolillo* (Figura 6). Se dice que un grupo de objetos se dispone *al tresbolillo* cuando los mismos se disponen en filas paralelas, de modo que los de cada fila correspondan al medio de los huecos de la fila inmediata.

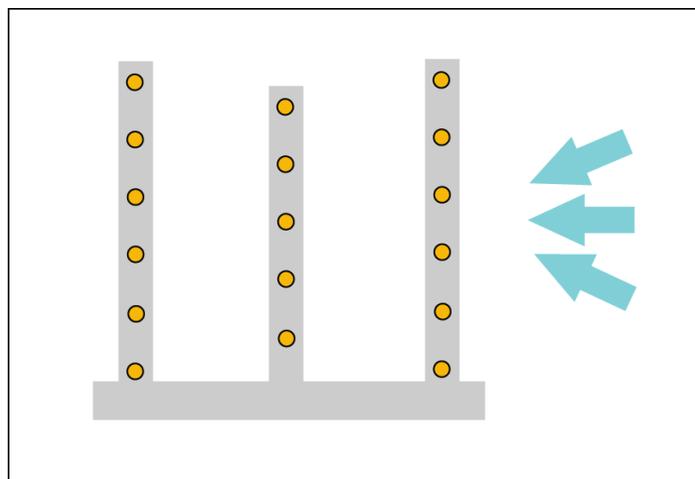


Figura 6 Configuración de un parque eólico al tresbolillo. (Fuente Wikipedia)

En la Figura 8 y la Figura 9 se muestran configuraciones típicas de parques eólicos sobre terrenos que presentan colinas.

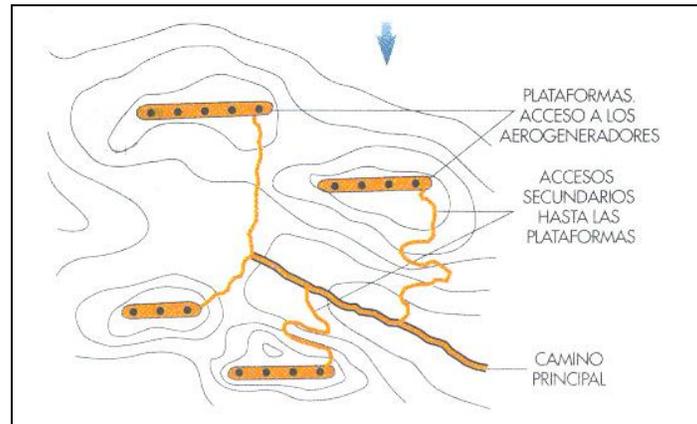


Figura 8. Configuración del parque eólico sobre colinas no alineadas. (Fuente Wikipedia)

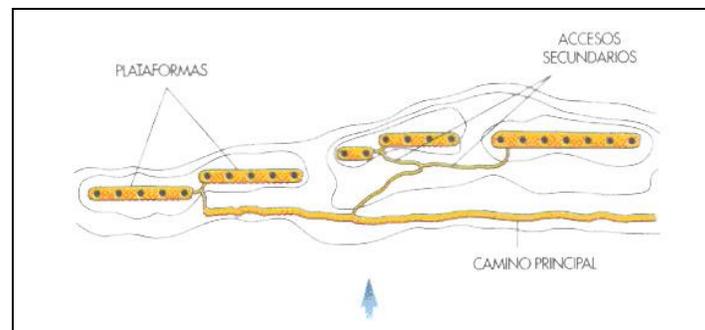


Figura 9. Configuración del parque eólico sobre colinas alineadas. (Fuente Wikipedia)

Como se puede observar, existe un espaciamiento o distancia de un aerogenerador a otro, tanto de frente al viento o transversal, como en la dirección del viento. Estos espaciamientos configuran la geometría del parque y determinan las pérdidas aerodinámicas del parque o pérdidas por configuración del parque.

En estas pérdidas influye lo que se denomina, *la sombra* que un aerogenerador provoca sobre el aerogenerador que le sigue por lo que debe mantenerse una distancia mínima de uno a otro. Esto lo provoca la conocida *estela aerodinámica*. Una turbina que se encuentre detrás de otra podrá extraer menos energía por ser la velocidad menor debido a la estela que se forma, o dicho de otra forma, por la

sombra aerodinámica de una turbina sobre otra. Esto ocurre en los parques eólicos, donde la interferencia de una turbina sobre otra trae como resultado una disminución de la energía extraída.

A esto se le conoce como las pérdidas aerodinámicas del parque. Un espaciamiento muy cercano de las turbinas permite instalar más turbinas en el sitio, pero reducirá la energía promedio captada por cada turbina en el parque eólico

Las pérdidas aerodinámicas pueden reducirse optimizando la geometría del parque eólico. Diferentes distribuciones de tamaños de turbinas, la forma general, el tamaño de la distribución y el espaciamiento dentro del parque eólico influyen sobre los efectos de la estela que reduce la captación de energía.

Cuando existe un viento con una dirección predominante, en general se recomienda una distribución en filas alineadas, con separación transversal (perpendicular a la del viento dominante) entre turbinas, de 3 a 5 veces el diámetro del rotor y de 5 a 9 veces en dirección del viento dominante. Cuando el viento tiene frecuentes cambios de dirección con respecto a la velocidad predominante, los aerogeneradores se colocan al tresbolillo.

El cálculo de las pérdidas aerodinámicas del parque necesita del conocimiento de la ubicación y características de las turbinas en el parque, del régimen de viento y poseer un modelo de las estelas de las turbinas, para determinar el efecto de las turbinas corriente arriba sobre las turbinas corriente abajo.

1.4 Mini-aerogeneradores

Para los mini-aerogeneradores urbanos los lugares ideales son aquellos donde se crean túneles de viento formados por las estructuras aledañas al mismo donde las velocidades de este son mayores a la de los demás lugares de la ciudad.

El aerogenerador mini-eólico, está diseñado para cubrir las demandas energéticas de cualquier vivienda habitual, incluso con viento bajo. Su eficiencia de generación y diseño nos permite crear grupos de aerogeneradores para abastecer instalaciones trifásicas de gran potencia con un alto rendimiento. Su producción está certificada situándose en más de 70 kW/día, con medias de 9 a 10 m/s. En

este modelo la máxima generación energética detectada ha sido de 96 KWh/día en una media de 11 m/s.

Además de su gran eficiencia esta mini eólica se caracteriza por su ausencia total de ruido y gran robustez. Fabricada por las normativas más exigentes de calidad, aplicando la última tecnología de industrias propias como aeroespacial.

Mínimo Ruido: El ruido está en torno a un 1% por encima del ruido ambiente, siendo prácticamente inapreciable para nuestro oído.

Máxima eficiencia: Funciona con una simple brisa de 2 m/s y continúa funcionando a más de 40 m/s sin perder eficiencia de productividad.

Anticorrosivo: Tratado con cataforesis, se convierte en un conjunto, anticorrosivo y anti salino ideal para islas y costas.

Hermético: Sellado herméticamente en todas sus juntas, para evitar filtraciones de humedades y macropartículas que arrastra el aire. Evita deterioros en zonas de costas o desiertos donde hay mucha arena.

Robusto: Para poder soportar, fuertes vientos y ofrecer una larga vida de operación todas las piezas del equipo, están sobredimensionadas

1.5 – Vinculación de la tecnología CAD/CAM con el diseño de los aerogeneradores

La tecnología CAD/CAM tiene su auge en la década de los setenta, aunque en la actualidad se encuentra en la mayoría de las esferas de la producción, esta tecnología abstracta, integrada con otros subprocesos da como fruto un producto que inicia con el diseño y termina con la fabricación asistida por computadora. Esta tecnología ha estado muy ligada desde sus inicios con la ingeniería mecánica desde la rama de fabricación aeroespacial hasta la automovilística, hoy en día también su campo se expande hacia la energía renovable y muy ligada especialmente al estudio y diseño de los aerogeneradores llegando así al objetivo de esta investigación. El diseño de estos aerogeneradores mediante modelos creados en un computador permite buscar un mayor número de variantes, se pueden analizar mediante paquetes de análisis por elementos finitos (MEF) y obtener como resultado la variante más adecuada.

1.6 Papel del análisis con el MEF en el diseño de las paletas de un aerogenerador

El papel tradicional del análisis por elementos finitos en ingeniería mecánica ha sido evaluar las probabilidades de fallo estructural bajo un estado de cargas aplicadas. Siendo básicamente su papel durante los primeros 25 años de su aplicación en la energía renovable eólica. Desde entonces el panorama ha ampliado sus horizontes. El aumento de la capacidad de los ordenadores y la aparición de paquetes de software más completos, permiten la representación de modelos con características tridimensionales, más realistas, y la aplicación de métodos iterativos para describir el comportamiento mecánico a lo largo del tiempo o para determinar el funcionamiento de las paletas y del estado de carga al que ha estado sometido.

En cualquier caso, incluso en los modelos más sofisticados existe un alto grado de incertidumbre en cuanto a la influencia que tienen todas las hipótesis simplificadoras que siempre es necesario realizar. Pero lo que sí permiten estos modelos es modificar fácilmente los parámetros, de forma que se puede evaluar su

influencia en el comportamiento mecánico de la estructura. En este sentido también se puede estudiar el efecto de ciertas hipótesis consideradas. Pero para realizar un análisis paramétrico, se deben cumplir dos condiciones: por un lado, el modelo debe ser lo suficientemente simple como para utilizarlo repetidamente, y debe limitarse el número de parámetros; por otra parte, el modelo debe ser lo suficientemente realista como para permitir garantizar los resultados obtenidos, y debe estar suficientemente clara su relación con la estructura real.

A la vista de lo indicado anteriormente, el papel del método de los elementos finitos en la presente investigación puede desglosarse en tres aspectos principales:

1. En primer lugar puede ser una herramienta para interrelacionar datos experimentales e integrarlos en modelos que expliquen los fenómenos mecánicos que realmente ocurren. Debido a sus bases analíticas, pueden erigirse en una herramienta más potente en estos aspectos que un modelo estadístico.
2. En segundo lugar, se puede aplicar como método de extrapolación de datos, estimando variables que no podrían ser determinadas de otra manera. Otro ejemplo de este papel del análisis por elementos finitos es la extrapolación de datos experimentales sobre otros estudios relacionados con el tema en cuestión.

Por último, el análisis por elementos finitos puede usarse como un método de experimentación numérica, muy similar en concepto a los otros métodos experimentales. En cuanto a aspectos prácticos, la integración del análisis con elementos finitos lo convierte en una herramienta con un buen número de aplicaciones. Otro aspecto no menos importante es la relación costo - efectividad del método de los elementos finitos. Su versatilidad frente a los costosos procedimientos experimentales los presenta como un método barato frente a estos, y cada vez más accesible al presentarse en paquetes de software muy bien elaborados (Escribano y Contreras, 2005).

CAPÍTULO II. MODELACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA PALA DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA TIPO MINI.

En el presente capítulo se modelara la pala de un aerogenerador de baja potencia tipo Mini en el software CAD SolidWorks en su versión 2013, la pala se modelará como sólido teniendo en cuenta para su análisis la estructura interna del cual está compuesta así como el material asignado (Aluminio 1060) con las propiedades mecánicas Isotrópico elástico lineal, acercándose a las condiciones reales de la pala.

Para ello se determinarán las condiciones de carga a las que está sometida la pala en condiciones de trabajo bajo la influencia de una velocidad de 10m/s. Se definirá la zona de apoyo, el tipo de restricción adoptado y se tendrán en cuenta cuatro posiciones de trabajo en función del instante de tiempo del ciclo de rotación del Aerogenerador al que se le realiza el estudio.

2.1 Análisis con el empleo del software SolidWorks/Simulation.

El Solid Works, es el paquete de modelado geométrico más popular en el diseño mecánico hoy en día, además de ser uno de los más completos aplicado en la rama de la mecánica. Reconocidas firmas en el mundo lo utilizan. De ahí el hecho de ser una potente herramienta para el diseño paramétrico. Se considera que este software junto a los otros es capaz de aumentar el rendimiento del diseño (comparado con el AutoCAD) hasta en un 40% (Calzadilla D. [2005]). En encuestas realizadas a más de 21,000 usuarios CAD se puede apreciar la aceptación del software.

Este ha sido un programa que por sus cualidades y ligereza comparado con otros sistemas del mismo rango se ha diseminado en la mayoría de las industrias y universidades del país con gran aceptación entre los usuarios, de fácil instalación, se puede trabajar en máquinas de hasta 512 Mb de memoria RAM, contiene ficheros de intercambio con los softwares *MedCAD* (Modelos CAD a partir de imágenes médicas) como el MIMICS lo cual permite importar

modelos de huesos humanos trabajados en estos softwares y tiene acoplado un paquete de cálculos por elementos finitos (Simulation) en su versión 2013 por lo que no existe la necesidad de emigrar a otro software para analizar los modelos.

El sistema de análisis por elementos finitos Simulation es un sistema de análisis interactivo con interface en línea al Sistema CAD SolidWorks, y a su vez permite la importación de modelos geométricos de otros Sistemas CAD, así como la importación y exportación de modelos FEA (Finit Element Analisis) desde y hacia otros paquetes de análisis por Elementos Finitos, un generador de malla y un pre y post procesador de elementos finitos, forma parte de una familia amplia de paquetes de análisis a partir del paquete matriz de Cosmos M, derivados a partir de la complementación de este con paquetes CAD para aprovechar las ventajas de estos paquetes gráficos en el diseño de elementos y conjuntos mecánicos. El Simulation usa el Método de los Elementos Finitos (MEF). El MEF es una técnica numérica para analizar los diseños en ingeniería, se acepta como el método de análisis estándar debido a su generalidad y conveniencia para la aplicación en la computadora. En el MEF se divide al modelo en muchos pedazos pequeños de formas simples llamados elementos (los así llamados elementos finitos) que reemplazan un problema complejo eficazmente por muchos problemas simples que necesitan ser resueltos simultáneamente. Los elementos se unen a través de puntos llamados nodos. El proceso de dividir el modelo en partes pequeñas se llama mallado. El comportamiento de cada elemento es conocido bajo diferentes condiciones de borde. El Método de los Elementos Finitos usa diferentes tipos de elementos. La respuesta en cualquier punto en un elemento se interpola a partir de la respuesta en los nodos del elemento. Cada nodo se describe totalmente por varios parámetros que dependen del tipo del análisis y el elemento que se usó. Por ejemplo, la temperatura de un nodo describe su respuesta totalmente en el análisis termal. Para los análisis estructurales, la respuesta de un nodo se describe, en general, por tres traslaciones y tres rotaciones. [Fuente Estrada Cingualbres].

2.2 - Descripción funcional de la pala

Las palas son capaces de aguantar los vientos más fuertes en cualquier situación climatológica. El diseño especial de las mismas está optimizado en conjunto con el paso variable para un bajo nivel de ruido. El conjunto resultante es una pala con un óptimo perfil aerodinámico que ofrece una gran dureza con un mínimo peso. (Ver figura 10). La mayoría de los aerogeneradores modernos tienen este diseño, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño de tres Palas.

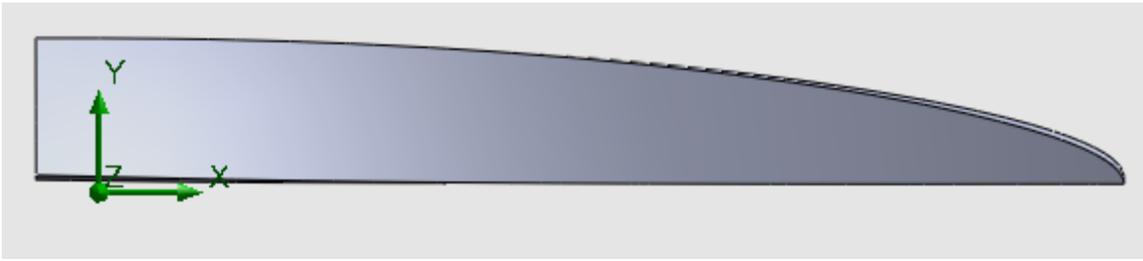


Figura 10 – Pala de un aerogenerador de tipo Mini. Fuente: (Solidwork 2013).

2.2.1 Propiedades mecánicas de la pala.

Las palas están fabricadas de una aleación de Aluminio 1060, combinadas según estructura. Pesan menos que las normalmente utilizadas y con una resistencia mecánica superior. Esto se consigue porque para la fabricación de las palas utilizamos la tecnología más avanzada que se usa en las grandes turbinas. Presentan un comportamiento excelente frente a cargas de tracción y de fatiga, y un equilibrio óptimo reduciendo al mínimo el empuje horizontal.

Las propiedades mecánicas del material antes mencionado se muestran en la Tabla 2.1 Fuente (SolidWorks Materials [2013]).

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas del material que compone la pala. Fuente SolidWork 2013

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad en X	69000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson en XY	0.33	N/D
Módulo cortante en XY	27000	N/mm ²
Densidad de masa	2700	kg/m ³
Límite de tracción en X	68.94	N/mm ²
Límite de compresión en X		N/mm ²
Límite elástico	27.57	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica en X	2.4e-005	/K
Conductividad térmica en X	200	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

2.3-Aplicación de las restricciones y mallado.

Aplicación de las restricciones.

La pala se ha considerado empotrado en la zona inferior del mismo, eliminando los seis grados de libertad en cada nodo, es decir, en la unión con el generador, situación que se puede considerar análoga al funcionamiento real del Aerogenerador. En la figura 11 se puede apreciar las restricciones de la pala.

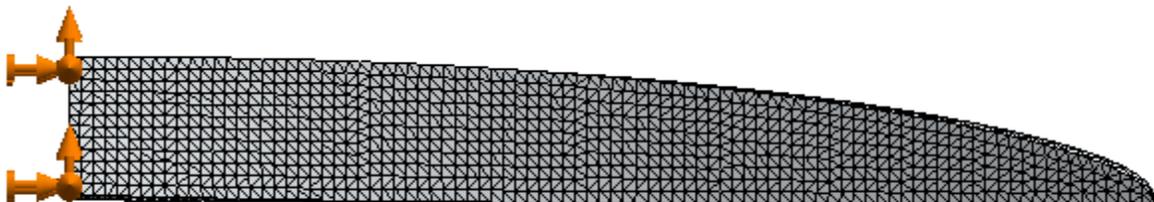


Figura 11 Modelo de la pala con restricciones. (Fuente SolidWork 2013)

Mallado de la pala.

Se realizó un mallado estándar utilizando un elemento finito tipo sólido tetraédrico con calidad de malla de alto orden y tres grados de libertad por nodo, con un tamaño de elementos de 16.76mm, una tolerancia de 0.8384mm y verificación jacobina en 4 puntos, obteniéndose un mallado con 17278 nodos y 9983 elementos como se puede apreciar en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Características del mallado aplicado a la pala.

Nombre de estudio	Estudio 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	16.7697 mm
Tolerancia	0.838485 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	17278
Número total de elementos	9983
Cociente de aspecto máximo	4.1504
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.8
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	

2.4 Aplicación de las cargas a la pala.

Para determinar el valor de las cargas aplicadas a la pala del Aerogenerador de tipo mini se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

Densidad del aire a 30°C=1.17 Kg/m³

Velocidad promedio del viento de 10 m/s

Área de la pala según Solidwork de 0.23m²

Una vez obtenidos estos valores pasamos a determinar el valor de la Fuerza existente en la pala mediante la siguiente formula:

$$F = \frac{1}{2} \rho * A * v^2$$

$$F = \frac{1}{2} * 1.17 \text{ kg/m}^3 * 0.23 \text{ m}^2 * (10 \text{ m/s})^2$$

$$F = \frac{1}{2} \rho * 0.23 \text{ m}^2 * (10 \text{ m/s})^2$$

$$F = 13.44 \text{ N}$$

También se tuvo en cuenta para la determinación de las cargas actuantes en la Pala la fuerza de gravedad el cual se tomó en cuatro momentos de trabajo, para 90°, 180°, 270°, 360° y con un valor de 9.81m/s² como se aprecia en la figura 12.

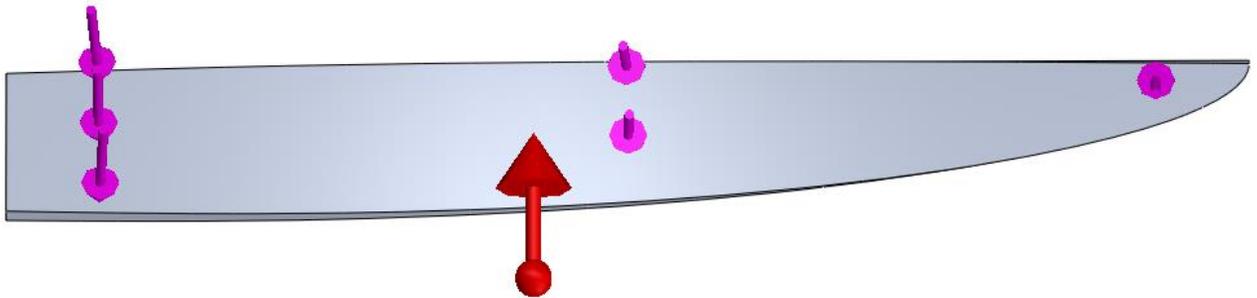


Figura 12. Cargas actuantes en la pala

2.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

2.5.1 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 90° de giro.

Para el análisis de la distribución de las tensiones a las que está sometido la pala en su estado normal de carga, se analizan las tensiones de Von Mises a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X (Figura 13), estas tensiones alcanzan un valor máximo de 1.8 MPa el cual se encuentra por debajo del límite elástico del material 27.6 Mpa proporcionando un FDS mínimo de 16.

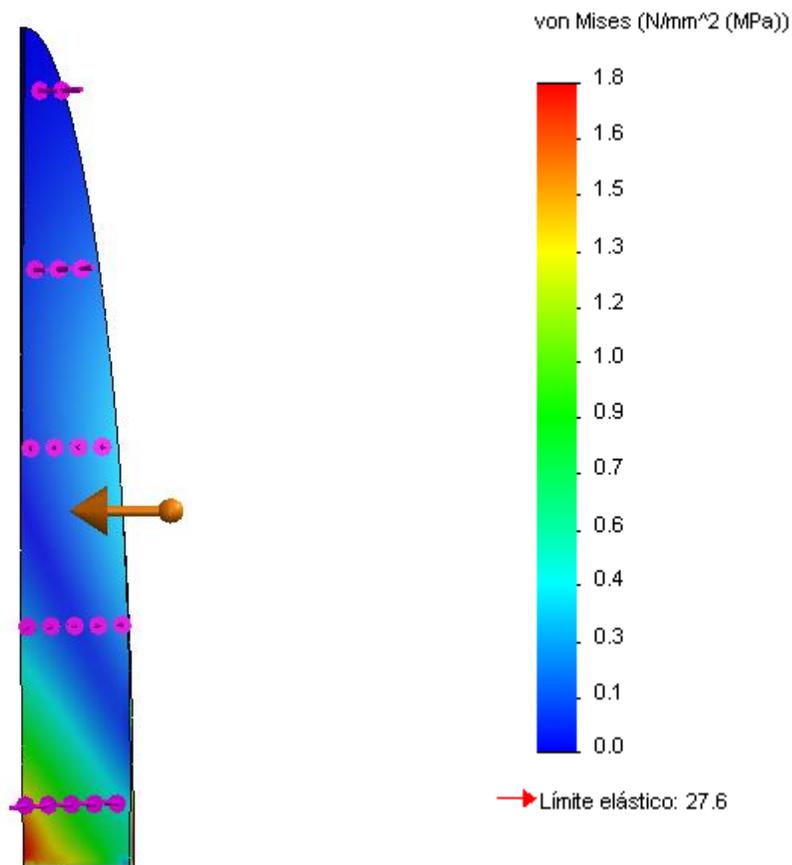


Figura 13 Distribución de tensiones de Von Mises en la pala a 90°. (Fuente SolidWork 2013)

2.5.2 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 180° de giro.

Para el análisis de la distribución de las tensiones a las que está sometido la pala en su estado normal de carga, se analizan las tensiones de Von Mises a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X (Figura 14), estas tensiones alcanzan un valor máximo de 0.5 MPa el cual se encuentra por debajo del límite elástico del material 27.6 MPa proporcionando un FDS mínimo de 54.

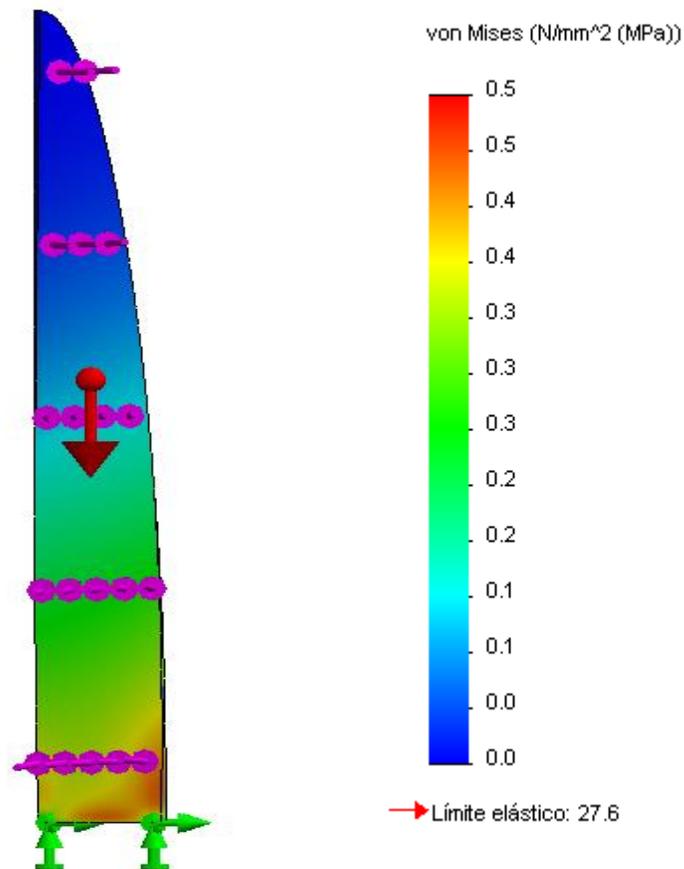


Figura 14 Distribución de tensiones de Von Mises en la pala a 180°. (Fuente SolidWork 2013)

2.5.3 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 270° de giro.

Para el análisis de la distribución de las tensiones a las que está sometido la pala en su estado normal de carga, se analizan las tensiones de Von Mises a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X (Figura 15), estas tensiones alcanzan un valor máximo de 2.8 MPa el cual se encuentra por debajo del límite elástico del material 27.6 MPa proporcionando un FDS mínimo de 10.

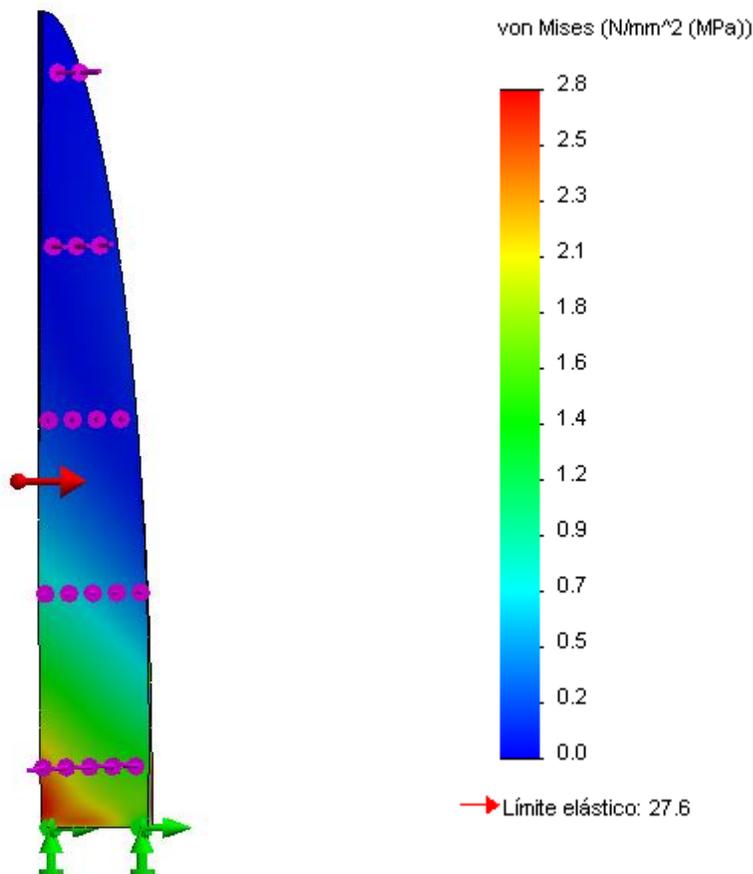


Figura 15. Distribución de tensiones de Von Mises en la pala a 270°. (Fuente SolidWork2013)

2.5.4 Análisis de la distribución de tensiones en la pala a 360° de giro.

Para el análisis de la distribución de las tensiones a las que está sometido la pala en su estado normal de carga, se analizan las tensiones de Von Mises a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X (Figura 16), estas tensiones alcanzan un valor máximo de 0.7 MPa el cual se encuentra por debajo del límite elástico del material 27.6 MPa proporcionando un FDS mínimo de 42.

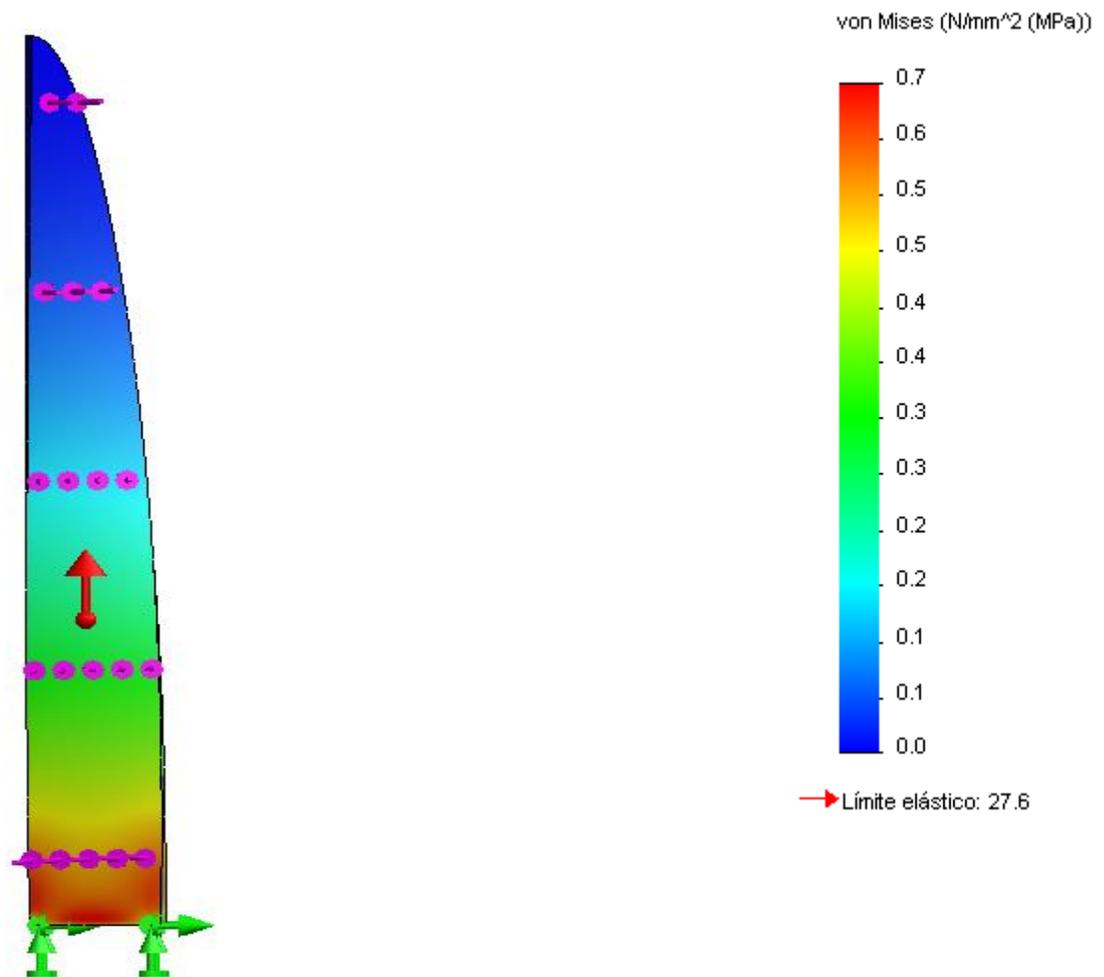


Figura 16. Distribución de tensiones de Von Mises en la pala a 360°. (Fuente elaboración propia)

Una vez analizados los resultados comparativos de las diferentes variantes de posición de la pala, se mostraran los resultados en la siguiente tabla. En la figura 17 se muestran estos resultados en forma de gráfica.

Tabla. 2.5 Tensiones máximas de las diferentes variantes de posición de la pala durante su funcionamiento.

Pala	Tensiones de Von Mises (MPa)
90 ⁰ grados	1.8
180 ⁰ grados	0.5
270 ⁰ grados	2.8
360 ⁰ grados	0.7

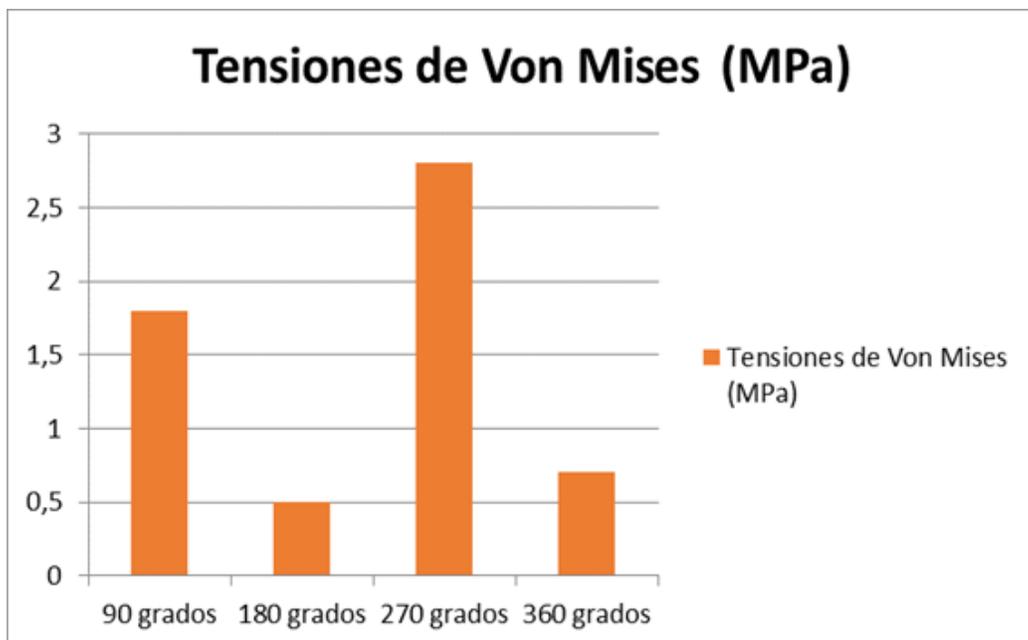


Figura 17 Comparación de las diferentes variantes de posición de la pala en función de las tensiones máximas de Von Mises.

2.5.5 Análisis de los desplazamientos en la pala a 90° de giro.

Para el comportamiento de los desplazamientos que aparecen en la pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estos desplazamientos alcanzan un valor máximo de 0.376 mm en el extremo superior de la misma como se aprecia en la Figura 18

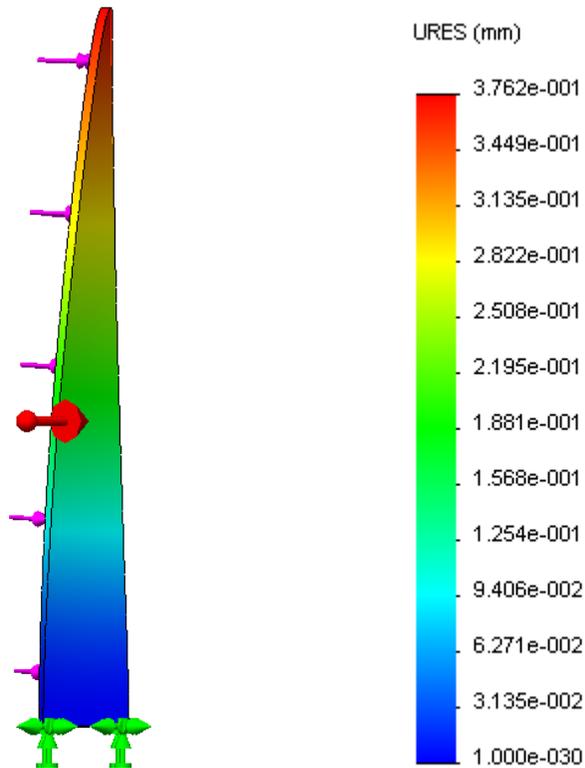


Figura 18. Comportamiento de los desplazamientos en la pala a 90°. (Fuente SolidWork 2013)

2.5.6 Análisis de los desplazamientos en la pala a 180° de giro.

Para el comportamiento de los desplazamientos que aparecen en la pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estos desplazamientos alcanzan un valor máximo de 0.405 mm en el extremo superior de la misma como se aprecia en la Figura 19

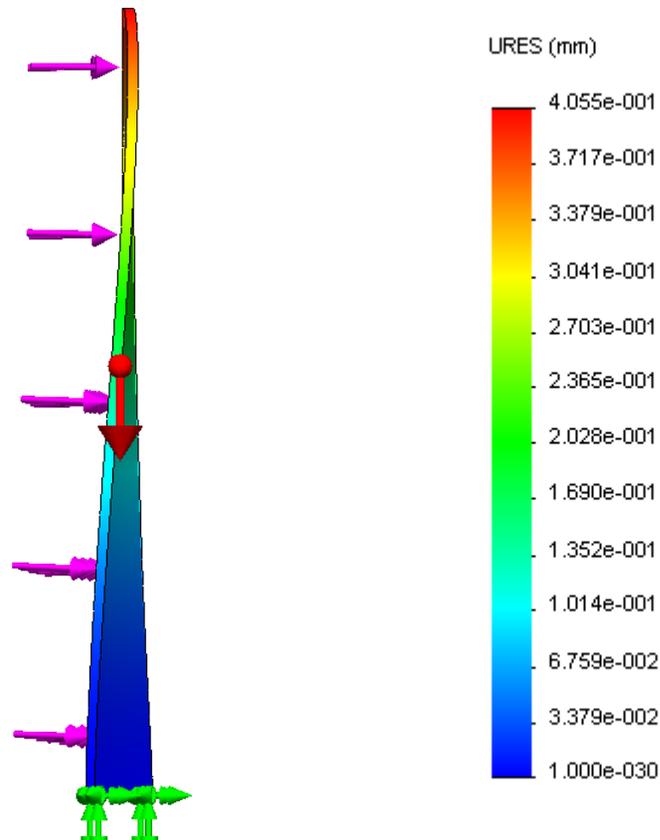


Figura 19. Comportamiento de los desplazamientos en la pala a 180°. (Fuente SolidWork 2013)

2.5.7 Análisis de los desplazamientos en la pala a 270° de giro.

Para el comportamiento de los desplazamientos que aparecen en la pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estos desplazamientos alcanzan un valor máximo de 1.24 mm en el extremo superior de la misma como se aprecia en la Figura 20

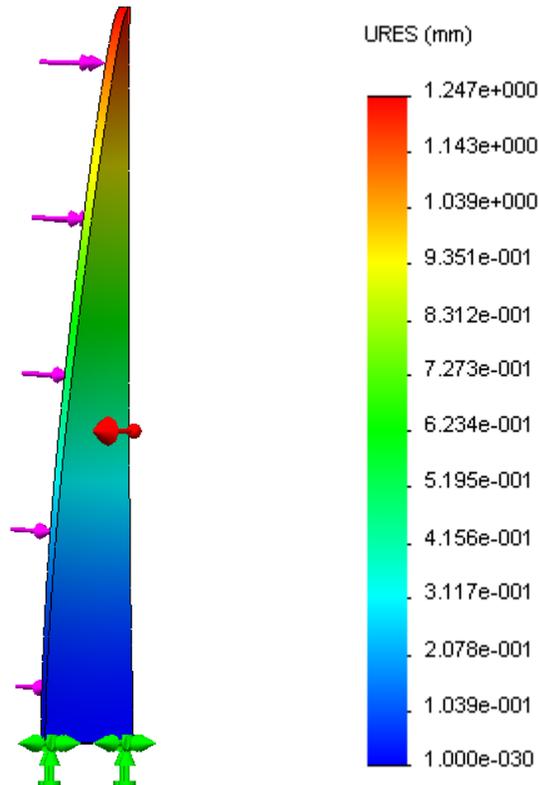


Figura 20. Comportamiento de los desplazamientos en la pala a 270°. (Fuente SolidWork 2013)

2.5.8 Análisis de los desplazamientos en la pala a 360° de giro.

Para el comportamiento de los desplazamientos que aparecen en la pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estos desplazamientos alcanzan un valor máximo de 0.480mm en el extremo superior de la misma como se aprecia en la Figura 21.

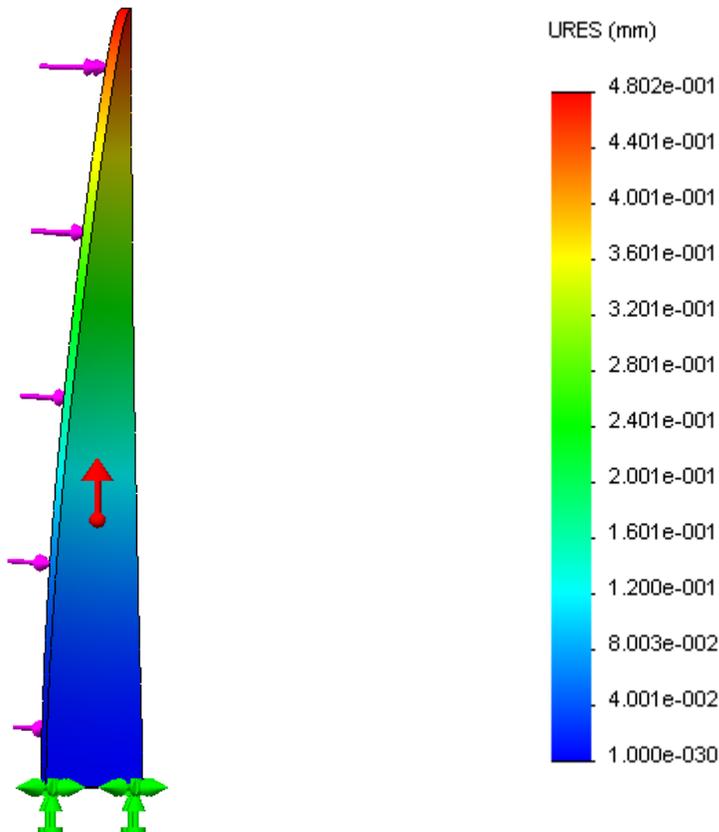


Figura 21. Comportamiento de los desplazamientos en la pala a 360°. (Fuente SolidWork 2013)

Una vez analizados los resultados de los desplazamientos en las diferentes variantes de posición de la pala, se mostrarán los resultados en la siguiente tabla. En la figura 22 se muestran estos resultados en forma de gráfica.

Tabla. 2.5.9 Desplazamientos de las diferentes variantes de posición de la pala durante su funcionamiento.

Pala	Desplazamientos en (mm)
90 ^o grados	0.376
180 ^o grados	0.405
270 ^o grados	1.24
360 ^o grados	0.7

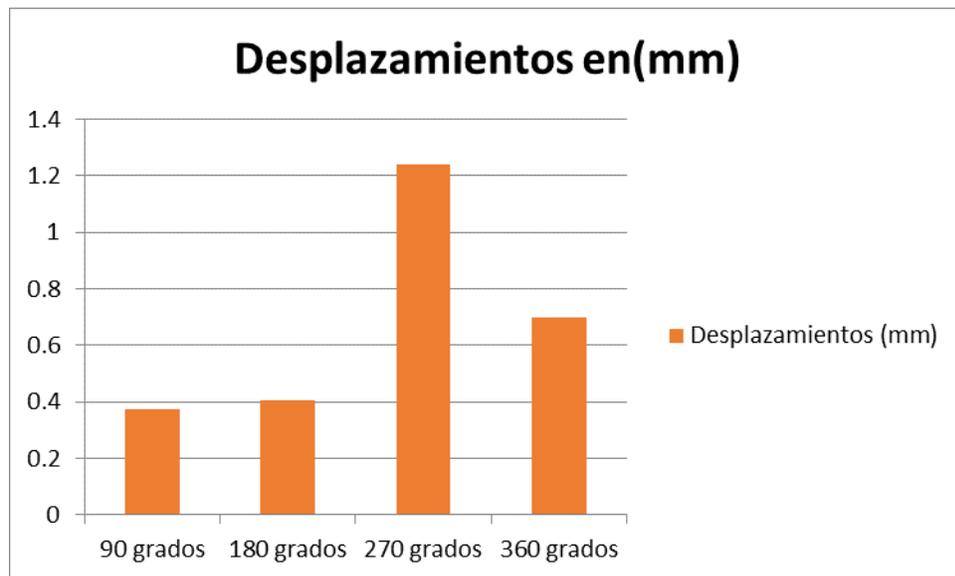


Figura 22 Comparación de las diferentes variantes de posición de la Pala en función de los Desplazamientos.

2.6 Análisis de las Deformaciones en la pala a 90° de giro.

Para el comportamiento de las Deformaciones que aparecen en la pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estas Deformaciones alcanzan un valor máximo de $1.79e^{-005}$ en el extremo inferior de la misma como se aprecia en la Figura 23

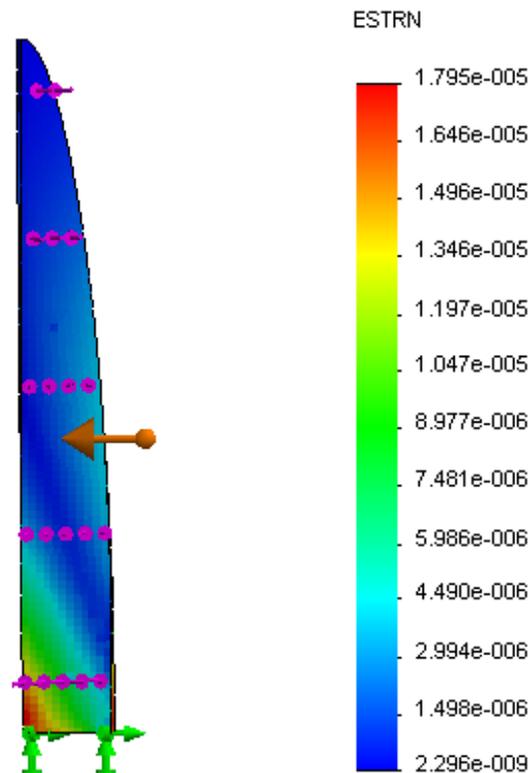


Figura 23. Comportamiento de las Deformaciones en la pala a 90°. (Fuente SolidWork 2013)

2.6.1 Análisis de las Deformaciones en la pala a 180° de giro.

Para el comportamiento de las deformaciones que aparecen en la pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estas deformaciones alcanzan un valor máximo de $5.31e^{-006}$ en el extremo inferior de la misma como se aprecia en la Figura 24.

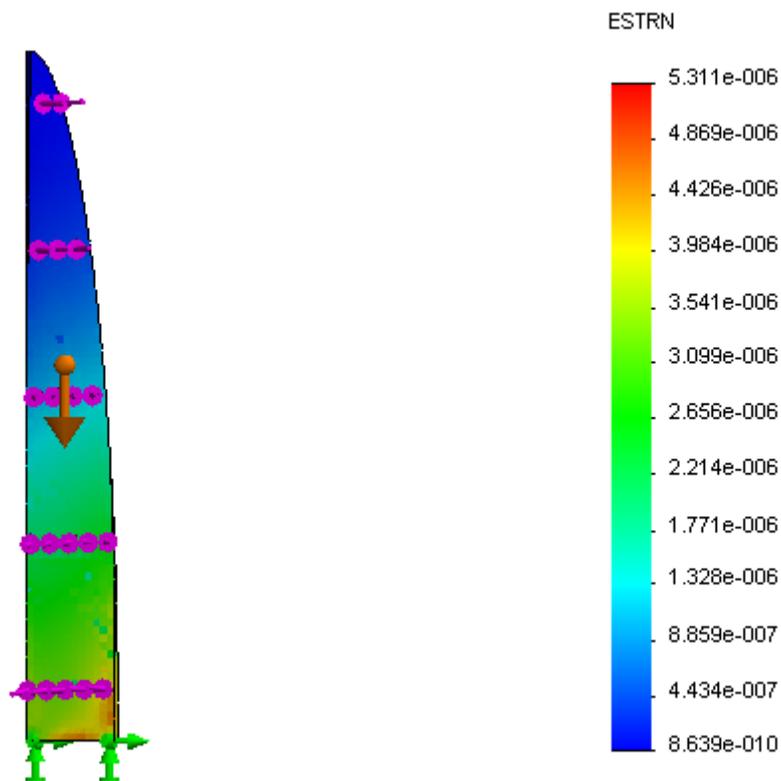


Figura 24. Comportamiento de las Deformaciones en la Pala a 180°. (Fuente elaboración propia)

2.6.2 Análisis de las Deformaciones en la Pala a 270° de giro.

Para el comportamiento de las Deformaciones que aparecen en la Pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estas Deformaciones alcanzan un valor máximo de $2.74e^{-005}$ en el extremo inferior de la misma como se aprecia en la Figura 3.13.

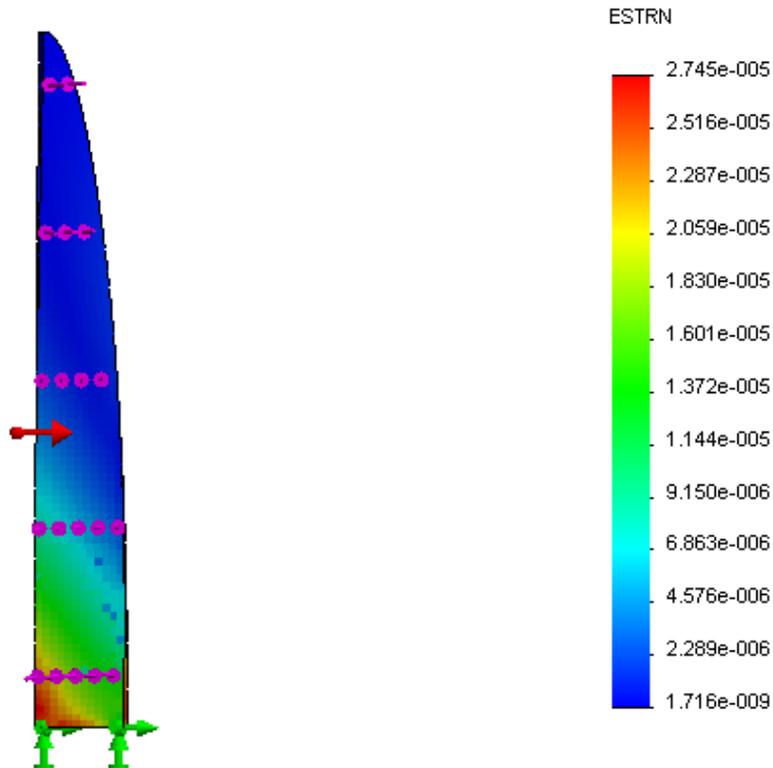


Figura 25 Comportamiento de las Deformaciones en la Pala a 270°. (Fuente SolidWork2013)

2.6.3 Análisis de las deformaciones en la pala a 360° de giro.

Para el comportamiento de las Deformaciones que aparecen en la Pala producto a su estado normal de carga, se analizaran sus valores a lo largo del eje longitudinal de la misma, o sea el eje X, estas Deformaciones alcanzan un valor máximo de $6.71e^{-006}$ en el extremo inferior de la misma como se aprecia en la Figura 26

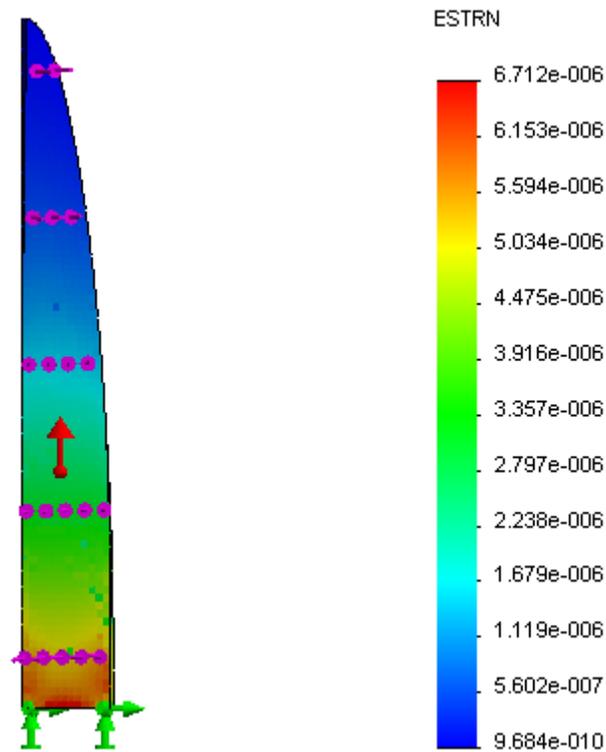


Figura 2.6.1 Comportamiento de las Deformaciones en la pala a 360°. (Fuente SolidWork2013)

Una vez analizados los resultados de los en las diferentes variantes de posición de la Pala, se mostraran los resultados en la siguiente tabla. En la figura 27 se muestran estos resultados en forma de gráfica.

Tabla. 2. Deformaciones de las diferentes variantes de posición de la pala durante su funcionamiento.

Pala	Deformaciones en (ESTRN)
90 ⁰ grados	1.79e ⁻⁰⁰⁵
180 ⁰ grados	5.31e ⁻⁰⁰⁶
270 ⁰ grados	2.74e ⁻⁰⁰⁵
360 ⁰ grados	6.71e ⁻⁰⁰⁶

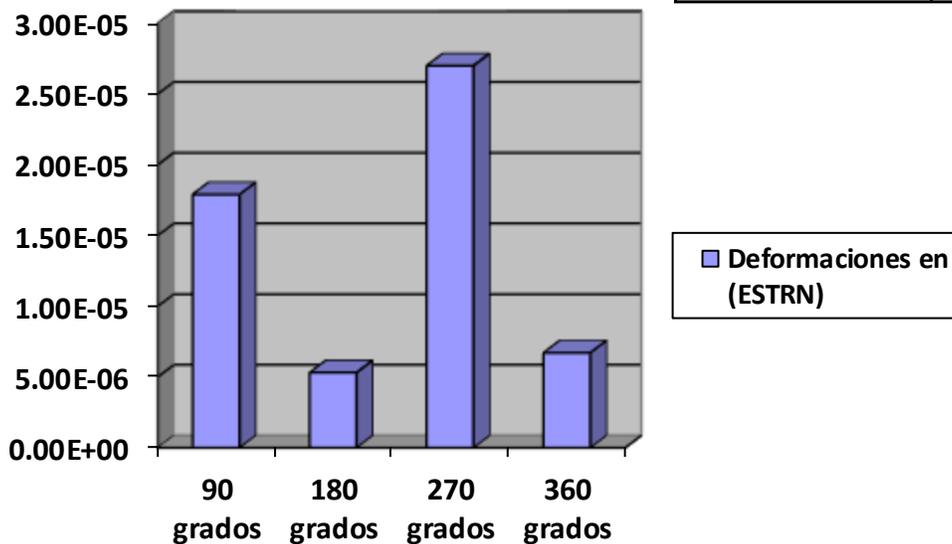


Figura 27 Comparación de las diferentes variantes de posición de la pala en función de las Deformaciones.

2.7 Comparación de los resultados obtenidos de tensiones, desplazamientos y deformaciones en la pala en las diferentes posiciones de trabajo.

La distribución de las tensiones de Von Mises a lo largo del eje longitudinal de la Pala que surgen debido a las cargas actuantes, o sea durante su régimen de trabajo son en la variante de 270⁰ las mayores, mientras q las menores son en la variante de 180⁰. Para los desplazamientos los mayores valores aparecen en la

variante de 270° , mientras q los menores se encuentran en la variante de 90° . Para las deformaciones los mayores valores aparecen en la variante de 270° , mientras que los menores valores aparecen en la variante de 360° . En la siguiente tabla se muestran los valores en forma de resumen así como en la figura 28.

Tabla. 2.7 Resumen de resultados obtenidos de la pala en las diferentes variantes de posición durante su funcionamiento.

Pala	Deformaciones en (ESTRN)	Desplazamientos en (mm)	Tensiones de Von Mises (MPa)
90° grados	$1.79e^{-005}$	0.376	1.8
180° grados	$5.31e^{-006}$	0.405	0.5
270° grados	$2.74e^{-005}$	1.24	2.8
360° grados	$6.71e^{-006}$	0.7	0.7

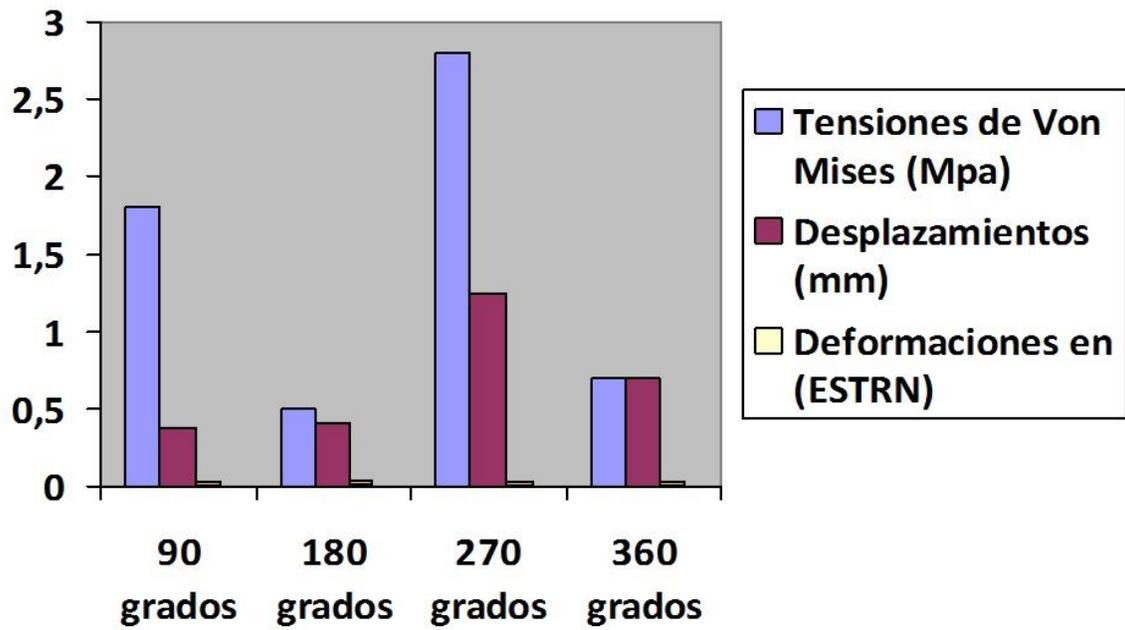


Figura 28- Resumen de resultados obtenidos de la Pala en las diferentes variantes de posición durante su funcionamiento.

CONCLUSIONES

1. Se realizó la investigación acerca de las aspas de un aerogenerador tipo mini y se apreció su comportamiento en condiciones de trabajo así como en diferentes posiciones de trabajo y se determinó en cual se aprecia el mayor estado tensional.
2. Se realizó el estudio por elementos finitos de una pala diseñada, para determinar el rango de los valores de tensiones que se producen en la misma, así como la distribución de las tensiones de Von Mises, Deformaciones y Desplazamientos por tener estos parámetros una influencia importante en el mecanismo de su funcionamiento.
3. En la variante de 270° es donde se obtuvieron los mayores valores de tensiones, deformaciones y desplazamientos mientras que la variante de 90° presenta los menores desplazamientos.
4. En la variante de 180° se obtuvieron lo menores valores de tensiones mientras que las deformaciones más pequeñas aparecen en la variante de 360° .

RECOMENDACIONES

1. Realzar estudios similares teniendo en cuenta otros materiales así como otras posiciones de trabajo.
2. Realizar estudios de la resistencia a fatiga de las palas de los aerogeneradores para comparar su comportamiento y determinar los ciclos de fatiga a los que se somete así como el tiempo de vida del mismo.
3. Realizar estudios dinámicos y de frecuencias propias del sistema.

BIBLIOGRAFIA

1. Las centrales eólicas. (2014). Explotación de Centrales Eólicas en Zonas Ciclónicas.
2. Amenedo, J. L. (2013). Tecnología de aerogeneradores. Madrid, España.
3. Ayestarán, A. C. (2011). Principales dispositivos de potencia. En Dispositivos de potencias (pág. 31).
4. Baranda, H. A. (2012). Especificación de mantenimiento. En Gamesa Eólica.
5. Bodoira, J. A. (2013). Proceso general de diseño. En Diseños de aerogeneradores (pág. 28).
6. Chapman, S. (2012). Máquinas Eléctricas.
7. CIRCUTOR (Ed.). (2014). Generación híbrida, con distintas fuentes de energías renovables.
8. Cruz Cabeza, M. (2014). Monografía ¿ Cómo se estructura y construye un trabajo de diploma? Universidad de Holguin.
9. Días, J. C. (2013). Sistemas de regulación y control de los aerogeneradores. Madrid, España.
10. Díez, P. F. (2011). La ingeniería eléctrica y energética. En la energía eólica (pág. 135).
11. Feito, J. S. (s.f.). Máquinas Eléctricas.
12. Fernández, D. M. (2009). Protección contra descargas atmosféricas. En Problemas con la introducción de la energía eólica en un sistema eléctrico (pág. 81).
13. Fernández, M. C. (2010). En L. G. Distribuida., Los Sistemas Eléctricos y la Energía Eólica. (págs. 20-22). La Habana.
14. 14-Figueredo, C. M. (2014). Hay viento para cubrir siete veces las necesidades actuales de energía eléctrica de la Humanidad. .
15. 15-Figueredo1, D. I. (2011). Diez preguntas y respuestas sobre energía. La Habana, Cuba.
16. Gómez, F. M. (2013). Tecnología de las palas de un aerogenerador. En Retos Tecnológicos en aerogeneradores (págs. 5-7).

17. Jensen, J. A. (2010). La mayor turbina de Grecia hasta la fecha. VestasGlobal, 20.
18. Jensen, J. A. (2012). Máximo rendimiento de los aerogeneradores. VestasGlobal, 20-25.
19. Laretta, R. A. (2014). Instrucciones de mantenimiento preventivo en aerogeneradores. En Gamesa Eólica (pág. 160).
20. Lic. Laretta, R. B. (2009). Paso de pala (paso fijo). En Control de aerogeneradores (pág. 34).
21. Londoño, J. P. (2009). Urbanización, degradación ambiental y riesgos derivados. Sostenibilidad Tecnología y Humanismo.
22. Lopez, J. M. (2012). Generación de energía eléctrica con energía eólica. En Mantenimiento financiación y gestión de parques.
23. Lorenz, R. D. (s.f.). Understanding modern power conversion.
24. Martínez, D. I. (2012). La energía eólica una necesidad de hoy y de mañana. Chile.
25. Milano, D. F. (2012). Ajustes Técnicos. En Análisis de Sistemas de Potencia en Ambiente de Mercados Eléctricos (págs. 70-78). Barcelona.
26. Milano, D. F. (2012). Flujo de Carga Óptimo. En D. F. Milano, Análisis de Sistemas de Potencia en Ambiente de Mercados Eléctricos (págs. 10-18).
27. Milano, F. (2013). PSAT. Recuperado el 3 de abril de 2015, de <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/>
28. Moreno, C. (2013). Los aerogeneradores y las turbulencias., (pág. 36). La Habana.
29. Moreno, C. (2014). Aerodinámica de los aerogeneradores. La Habana.
30. Nicolas, C. V. (s.f.). Control del generador eléctrico. Madrid, España.
31. Salcines, D. S. (2011). Evolución Tecnológica de los Aerogeneradores.
32. (2009). Funcionamiento y componentes . En J. I. San Martín Díaz, DISEÑO, ANIMACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE GENERADORES EÓLICOS COMO NUEVA METODOLOGÍA DIDÁCTICA APLICADA A LA ENSEÑANZA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES (pág. 15). Barcelona.

33. Sanchez, T. (2011). Inglés-Español. En Vocabulario Técnico de Energías renovables (pág. 60).
34. Vázquez, A. S. (s.f.). Recuperado el 2 de febrero de 2015, de Boletín de Energías Renovables: <http://www.energias-renovables.com>
35. Vázquez, A. S. (2015). El sector eólico. CUBAENERGIA.
36. Zimmermann, N. (2012). En A. C. Ayestarán, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO DE UN MICRO AEROGENERADOR” (pág. 16).