



Análisis teórico del desplazamiento de la punta para 2 palas de generador eólico.

Proyecto de Investigación

Por

Luis Genaro Sosa Lujano

En cumplimiento a los requerimientos para obtener
la Especialidad de Tecnólogo en Mecatrónica

Revisor académico: Dr. José Alfredo Manzo Preciado

Revisor de Planta: M. Jaime Espinoza Hernández

Santiago de Querétaro, Qro., México, Agosto 2019

Índice

Índice de Figuras	ii
Índice de Tablas.....	iii
Introducción	1
Planteamiento del Problema	2
Caso 1. Pala con sección transversal constante	2
Caso 2. Pala con sección transversal variable	3
Objetivos	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
Justificación	5
Antecedentes	7
Historia de la energía eólica	7
Partes de un generador eólico.	7
Importancia del análisis estructural	8
Metodología	11
Análisis ANSYS ACP™ (Pre)	12
Análisis ANSYS Structural™	13
Proceso para el perfil con sección transversal variable.	14
Resultados	16
Resultados para perfil de sección transversal constante.....	16
Resultados para perfil variable.....	19
Conclusiones	23
Conclusiones generales.....	23
Conclusiones para el perfil constante	23
Conclusiones para el perfil variable	24
Resumen.....	25
Bibliografía	26
Referencias:.....	26
Referencias Adicionales:	27
Anexos.....	28
Anexo 1. Características de palas de aerogenerador.....	28
Anexo 2. Causas de las principales fallas en palas eólicas. ^[4]	30
Anexo 3. Beneficios de las energías renovables. ^[4]	31

Índice de Figuras

Figura 1. Pala con sección transversal constante	2
Figura 2. Pala con sección transversal variable.....	3
Figura 3. Esquema de un Aerogenerador	7
Figura 4. Corte transversal que muestra las partes principales un aspa de generador eólico.....	8
Figura 5. Expectativa de crecimiento en los generadores offshore para E.U.....	9
Figura 6. Diagrama de bloques mostrando metodología de la solución.....	11
Figura 7. Molde para pala experimental.....	12
Figura 8. Imagen con la aplicación de las fuerzas para el perfil de sección transversal variable.....	15
Figura 9. Gráfica de datos para el perfil constante.....	16
Figura 10. Perfil hueco sin refuerzos . Fuerza = 50 N.....	17
Figura 11. Perfil reforzado con Spar Caps y Shear Web. Fuerza = 50 N.....	17
Figura 12. Perfil hueco sin refuerzos. Fuerza = 150 N.....	18
Figura 13. Perfil reforzado con Spar Caps y Shear Web. Fuerza = 150 N.....	18
Figura 14. Gráfica de reducción en desplazamiento para el perfil variable por tipo de refuerzo.....	20
Figura 15. Gráfica de reducción en desplazamiento para el perfil variable por tipo de refuerzo.....	20
Figura 16. Evento 1. Perfil hueco de 2 capas sin refuerzos.....	21
Figura 17. Evento 7. Perfil hueco de 3 capas con 2 refuerzos en las secciones A y B.....	21
Figura 18. Evento 10. Perfil hueco de 2 capas con 3 refuerzos en las capas A a C.	22
Figura 19. Evento 17. Perfil hueco de 3 capas con 2 refuerzos en las capas A a D.	22

Índice de Tablas.

Tabla 1. Palas y diámetros de rotor más grandes actualmente.-----	10
Tabla 2. Cargas aplicadas para cada sección del perfil con sección transversal variable. -----	13
Tabla 3. Refuerzos aplicados para analizar el perfil variable.-----	14
Tabla 4. Compilación de datos para el perfil constante.-----	16
Tabla 5. Resultados obtenidos para los eventos analizados del perfil variable.-----	19

Introducción

La obtención de la energía a partir del generador eólico se lleva a cabo mediante la oposición que ofrecen las palas generadoras al flujo del viento. Estas aspas se encuentran sometidas a diferentes esfuerzos durante su operación.

Para garantizar la eficiencia, confiabilidad y seguridad de las palas así como para garantizar que serán capaces de soportar los esfuerzos a los que serán sometidas se lleva a cabo el análisis estructural. Para llevar a cabo este análisis es necesario considerar las cargas a las que será sometida la pala, las condiciones de frontera, que es tal como se relaciona con el ambiente que la rodea, los requerimientos estructurales y adicionalmente las fallas previas que hayan ocurrido.

Las principales cargas a las que está sometida la pala generadora considerando que se encuentra en posición horizontal se pueden reducir a 2:

1. La carga del aire en la dirección perpendicular a la cuerda de la pala (dirección flapwise).
2. La carga que ejerce la gravedad sobre la pala (dirección edgewise).

Las condiciones de frontera es la unión de la pala con el eje de rotación.

Las cargas en dirección flapwise son soportadas en su mayoría por los refuerzos internos que lleva el perfil (Spar Caps y Shear Webs), mientras que las cargas en dirección vertical son soportadas por los refuerzos en los extremos anterior y posterior de la pala.

El análisis estructural de los componentes previo a su construcción juega un papel importante en su valoración, al efectuarse de manera adecuada proporciona información certera sobre su utilidad y duración.

Planteamiento del Problema

El presente proyecto analiza la variación en el desplazamiento del extremo libre de una pala de aerogenerador cuando el otro extremo permanece fijo, esto debido a las cargas aplicadas. Se analiza el caso para 2 geometrías diferentes:

Caso 1. Pala con sección transversal constante

Se analiza el desplazamiento en el extremo para una pala que cuentan con la misma geometría, de idéntico perfil, tal como se muestra en la figura 1:

- Largo = 130 cm
- Ancho = 11 cm
- Alto = 2.4 cm de alto.

Para esta pala se analiza el desplazamiento usando los 4 refuerzos siguientes indicados en fig.1:

1. Sin refuerzo
2. Shear Web
3. Spar capas
4. Spar caps y Shear web

Las estructura de las palas, refuerzos y propiedades se encuentra en la sección de Anexos.

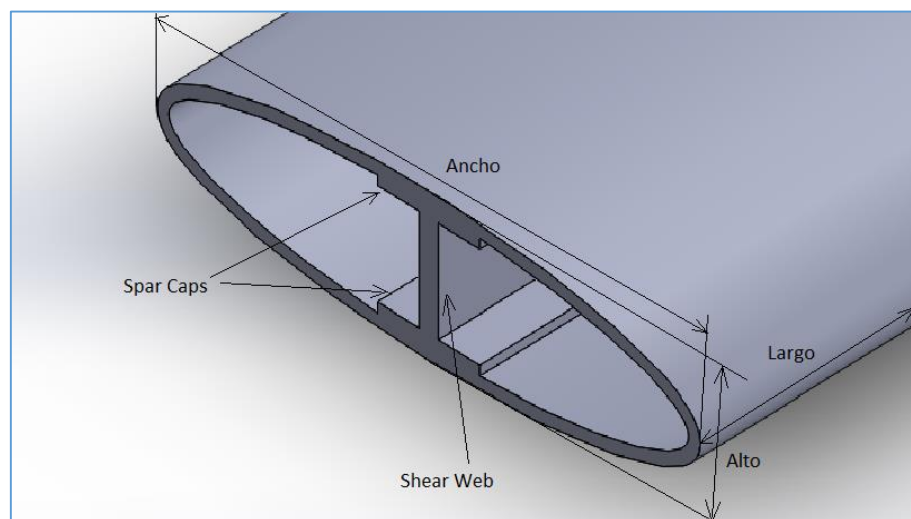


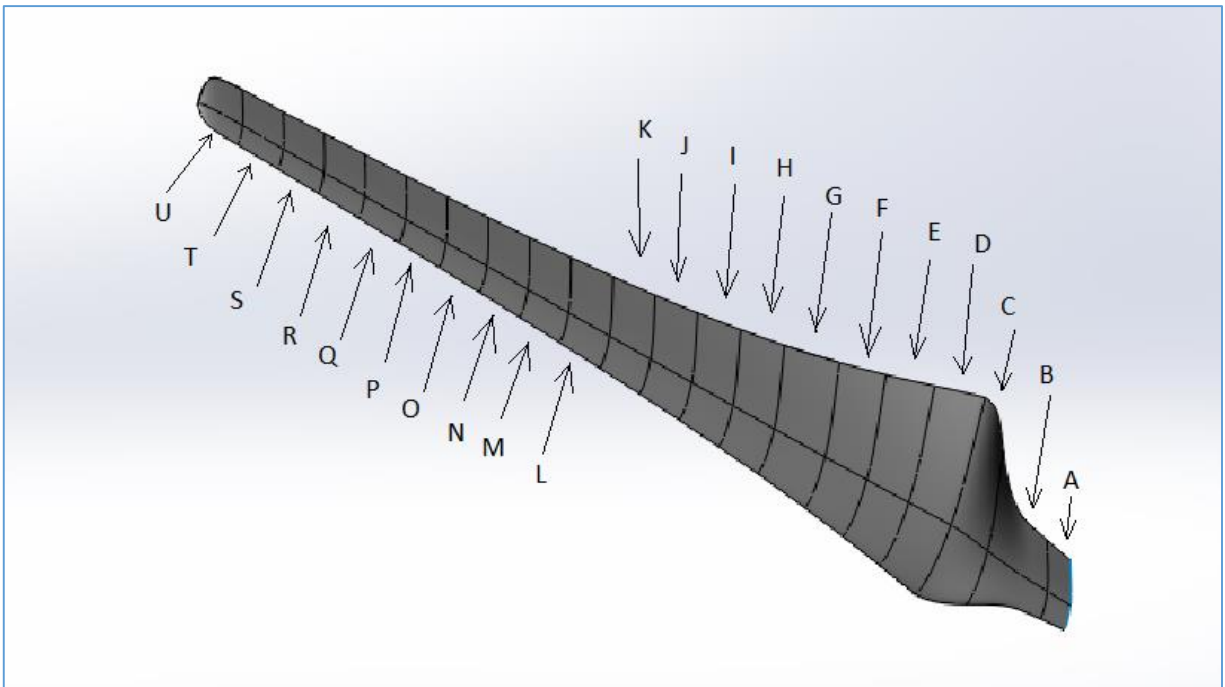
Figura 1. Pala con sección transversal constante

Caso 2. Pala con sección transversal variable

Se analiza el desplazamiento en la punta para una pala de aerogenerador con perfil variable:

- Largo = 1819.50 mm
- Cuerda Máxima= 281 mm
- Alto = 11 mm de alto en base

Las estructuras de las palas (figuras 1 y 2), refuerzos y propiedades se encuentra en la sección de Anexos.



a

Figura 2. Pala con sección transversal variable

El análisis para ambos casos se llevará mediante la aplicación del software ANSYS para obtener resultados preliminares, posteriormente se comprobará la veracidad de los resultados obtenidos mediante pruebas experimentales solamente para la primera pala.

Objetivos

Objetivo general

El Objetivo General es el mismo para los dos casos:

Obtener el desplazamiento de la punta para cada perfil mediante el análisis estructural, utilizando las herramientas computacionales.

Objetivos específicos

- Llevar a cabo el análisis estructural mediante FEM para las diferentes palas y refuerzos.
- Establecer un porcentaje de mejora para cada refuerzo usado en el perfil constante.
- Definir si existe algún comportamiento o relación para cada refuerzo del perfil constante.
- Involucrar al alumno con la terminología y método de análisis estructural para palas de aerogeneradores.
- Para el segundo perfil, optimizar su refuerzo para reducir el desplazamiento al menos un 60% respecto al perfil sin refuerzo.

Justificación

El sector energético se ha convertido en una condición para el crecimiento de los países debido a la relación entre el producto interno bruto y la demanda energética del país. El incremento de la población y su nivel de vida ha generado un aumento en la demanda de energía eléctrica. Esto ha obligado no solo a incrementar la eficiencia en los equipos de generación a partir de fuentes no renovables, adicionalmente ha obligado a buscar fuentes de energía alternas. ^[1]

Acorde a la experiencia internacional, el uso de fuentes renovables es vital para el crecimiento energético no solo en países desarrollados sino en países en vías de desarrollo gracias a los beneficios que las acompañan.

Algunos países han desarrollado tecnologías involucrando diversas fuentes renovables como medio de generación eléctrica. Si bien dichas fuentes no son los principales medios de generación, son precursoras del desarrollo y comercialización de nuevas tecnologías. Adicionalmente tienen la ventaja de que usan recursos locales y al reducir el consumo de combustibles fósiles, reducen también la contaminación. ^[2]

El crecimiento del uso de la energía eólica para obtención de energía eléctrica en los últimos años ha sido notorio así como el tamaño de las palas que lo producen aumentado el diámetro de los rotores de los 10-15 m hasta más de 150 m para equipos comerciales.

La industria de la energía eólica y los gobiernos basan sus planes de crecimiento en energías renovables con una esperanza de vida de 20 a 25 años para un generador eólico. Estudios recientes muestran que gran parte de las turbinas eólicas trabajan efectivamente durante 12 a 15 años. El costo de reemplazar generadores eólicos antes del tiempo pronosticado genera pérdidas económicas y hace las granjas eólicas más caras respecto al costo estimado originalmente. ^[3]

Una manera de hacer más competitiva la energía eólica que los recursos no renovables es mantener las turbinas generadoras en funcionamiento continuo con un mínimo de tiempo

perdido en mantenimientos planeados o no planeados. La instalación de los generadores eólicos debe ser en lugares donde la fuente de aire esté disponible en medida suficiente para hacer rentable su instalación. Mantener los equipos funcionando continuamente y sin fallas es un gran reto, dado que por lo general los lugares de instalación son sitios remotos, esto aunado al crecimiento de la capacidad y el tamaño los generadores eólicos.

Para conseguir este objetivo, uno de los retos más grandes es atacar la falla en componentes, que por lo general lleva constantemente a paros inesperados para reparación o reemplazo de partes, en este sentido, las palas de los generadores eólicos son los componentes más críticos y por lo mismo es importante mantener su integridad estructural.

Las fallas estructurales en las palas es una constante, en promedio, de una totalidad de 700,00 palas que se encuentran en operación alrededor del mundo se reportan 3,800 incidentes por falla cada año. Llevar a cabo un buen análisis estructural previo a la construcción de las palas de un aerogenerador da como resultado confiabilidad de operación adicional a los beneficios económicos. Las principales fallas son debidas a la combinación diversas causas, estas causas, así como los beneficios de utilizar energías renovables se enlistan en la sección de anexos.

Antecedentes

Historia de la energía eólica

Entendiendo por energía eólica el aprovechamiento de la energía cinética proporcionada por el viento para transformarla en otra energía, varios autores coinciden en que este tipo de tecnología no es nueva y su aprovechamiento se inició alrededor de 3000 a.C. con los barcos en Egipto, pasando a los molinos viento en la actual Afganistán para bombear agua y la molienda para posteriormente ser construidos en Francia e Inglaterra en el siglo XII. Se puede decir que la primera idea de un generador eléctrico fue de Lord Kelvin que en 1802 tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina que aprovechara el viento, lo cual no pudo lograrse sino hasta 1888 por Charles Brush. [5]

En la edad moderna, la crisis petrolera en los años 70-80 sirvió como detonante para las fuentes renovables para generación eléctrica, entre ellas la energía eólica. La capacidad instalada a nivel mundial para 2018 fue de 597 GW y durante ese año se agregaron 50,100 MW. Esto equivale al 6% de la energía eléctrica global requerida. [6]

Partes de un generador eólico.

La figura que se incluyen a continuación tiene la finalidad de involucrar al lector con las partes principales de un aerogenerador, para una descripción más detallada puede consultar las referencias citadas al final.

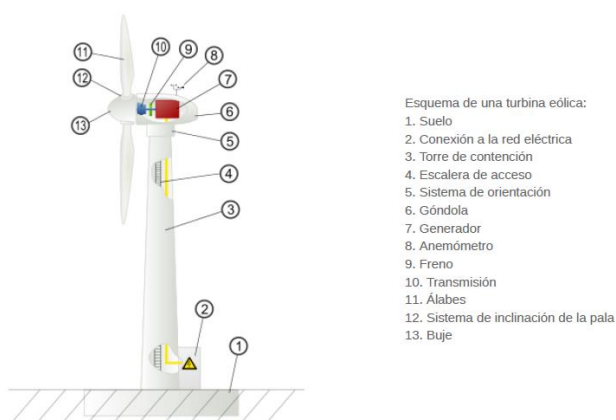


Figura 3. Esquema de un Aerogenerador. [7]

La figura 4 muestra el corte de una sección transversal de una pala de aerogenerador.

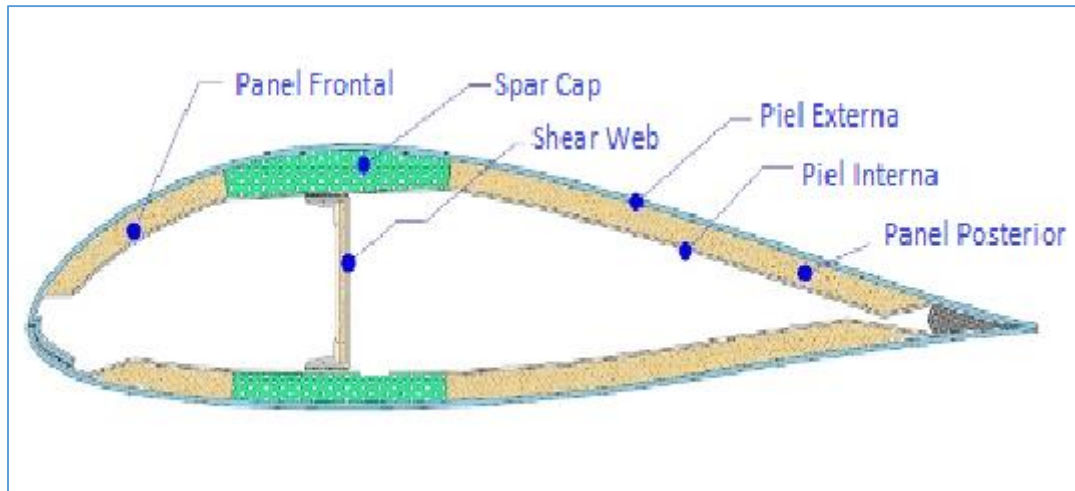


Figura 4. Corte transversal que muestra las partes principales un asa de generador eólico.

Importancia del análisis estructural

Entre todos los tipos de inconvenientes, las fallas estructurales catastróficas pueden causar no solo pérdidas económicas sino incurrir en un impacto social negativo. Se pueden obtener lecciones invaluable de esas fallas si se lleva a cabo una investigación técnica adecuada y propiamente documentada, ayudando así al mejoramiento del conocimiento acerca de las fallas estructurales en campo y transformándola en mejoras de métodos de diseño, técnicas de manufactura, operación y estrategias de mantenimiento de las palas del generador.

Las fallas estructurales relacionadas a las palas son por lo general grabadas pero rara vez incluidas en documentos académicos desde un punto de vista técnico principalmente porque las empresas no quieren dar a conocer sus problemas ni datos técnicos por confidencialidad comercial. Esta inaccesibilidad niega a otros la oportunidad de mejorar el diseño de palas y los procesos de manufactura para prevenir daños similares en el futuro. Las mejoras en diseño estructural pueden cambiar el hecho de que mientras más granjas eólicas existan, más accidentes ocurren. [8]

La mayoría de los estudios acerca de las fallas en palas hasta ahora se han llevado a cabo en laboratorios con información certera y en condiciones controladas. Los modos de falla y los mecanismos que llevan al colapso estructural se han investigado ampliamente, sin embargo, para conocer el mundo real de las fallas, a pesar de las dificultades que esto implica, se debe de recolectar datos confiables y reconstruir los accidentes que la ocasionaron, algunos de los

estudios se han llevado a cabo de esta manera. Parte de la información obtenida, que incluye las causas raíz de las fallas en las palas y las recomendaciones para posibles mejoras de diseño y estrategias de control se han compartido. Bajo ciertas circunstancias el daño estructural de las palas parece inevitable y otras veces aceptable con el fin de prevenir daños catastróficos en por colapso. [9]

En los generadores eólicos sigue habiendo muchas fallas de las palas durante su operación normal cuando se espera que permanezcan estructuralmente seguras durante un rango de seguridad amplio. A pesar de la necesidad de entender la falla estructural de las palas en operación normal, no hay estudios públicos hechos desde el punto de vista de una perspectiva estructural detallada [10]. La figura a continuación muestra los tamaños actuales y las expectativas de crecimiento en tamaño para los generadores eólicos. Se prevé un mayor crecimiento en los generadores off-shore porque son capaces de proveer mayor potencia por metro cuadrado que los ubicados en tierra.

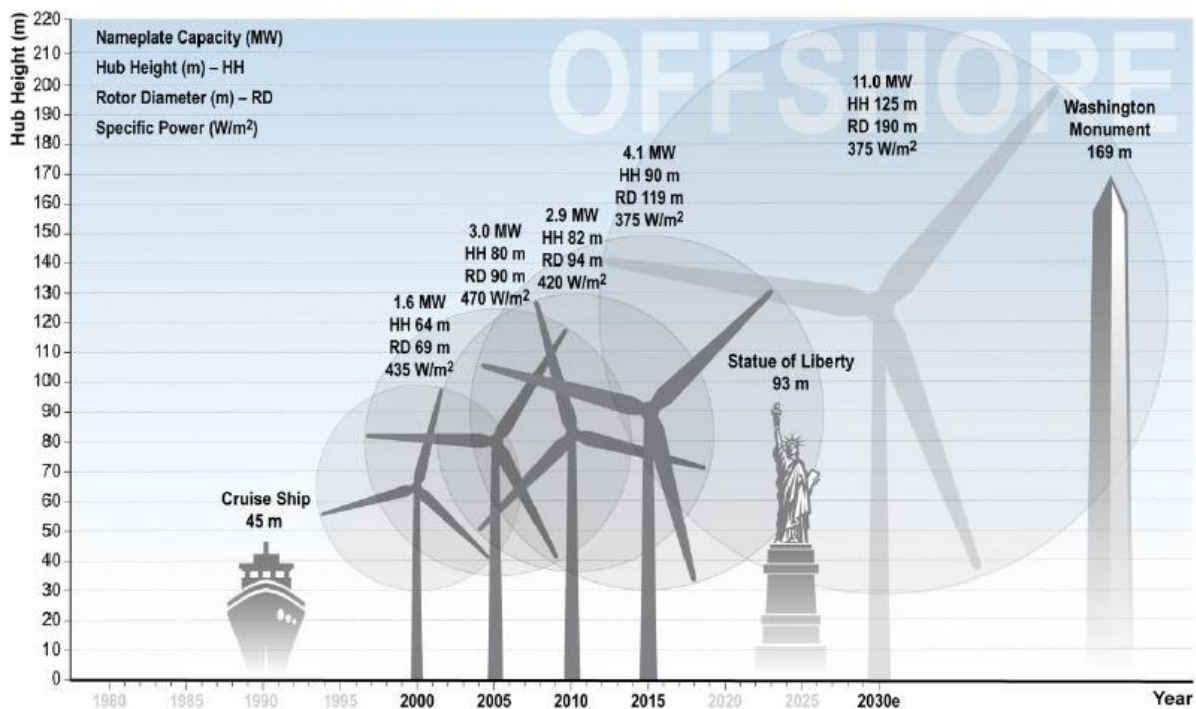


Figura 5. Expectativa de crecimiento en los generadores offshore para E.U. [11]

Si bien se tiene previsto un crecimiento gradual en el tamaño de las palas para aerogenerador, los datos actuales reflejan que los pronósticos son por lo general superados. Esto es un

aliciente adicional para involucrarse en el análisis estructural. La tabla 1 a continuación, muestra las dimensiones de las palas o diámetro del rotor más grandes hasta la actualidad.

Tabla 1. Palas y diámetros de rotor más grandes actualmente. ^{[12][13][14]}

Fecha	Tamaño	Componente	Empresa	Capacidad de generación
Abr 18, 2019	107 m	Pala	LM Wind	12MW
2016	88.4 m	Pala	LM Wind	8 MW
2017	167 m	Diámetro rotor	Siemens Gamesa	8 MW
2017	164 m	Diámetro rotor	MHI Vestas	8-8.8MW
2017?	154 m	Diámetro rotor	Goldwind	6.7 MW
2017	152 m	Diámetro rotor	Senvion	6.2 MW
2015	150 m	Diámetro rotor	GE	6 MW
2014	140 m	Diámetro rotor	Ming Yang	6 MW
2014	140 m	Diámetro rotor	Doosan	5.5 MW
?	136 m	Diámetro rotor	Hitachi	5.2 MW

Metodología

El diagrama de bloques a continuación muestra el proceso realizado durante el proyecto.

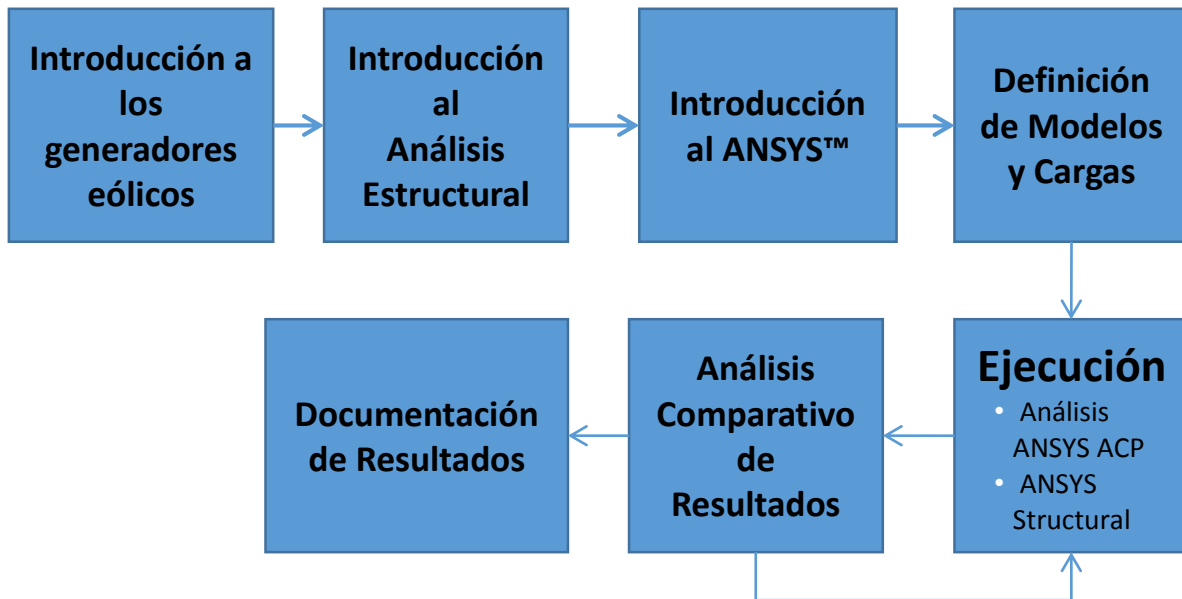


Figura 6. Diagrama de bloques mostrando metodología de la solución.

Al iniciar con el proyecto fue necesario involucrarse con los generadores eólicos, comenzando por la terminología y sus componentes, pasando por los diferentes tipos de generadores, algo de su historia, continuando con el comportamiento del flujo del aire a través de sus palas y las fuerzas a las que están sometidas estas. Finalmente los requerimientos de los materiales, las cargas aerodinámicas y su distribución a lo largo de la pala para dar paso al análisis estructural.

La introducción al análisis estructural comprendió las bases para el uso de algunos de los diferentes módulos de análisis computacional que están disponibles y son usados en el laboratorio de energía eólica del CIDESI. Si bien el software a usar para la elaboración del proyecto fueron el ANSYS ACP™ y el ANSYS Structural™, se consideró pertinente la introducción al ANSYS APDL™ así como análisis estructural en SOLID WORKS™ para tener una visión general.

Para la selección del modelo se utilizó el molde disponible en el laboratorio que al usarse da como resultado la pala con dimensiones descrita en el planteamiento del problema, esto debido a que posteriormente pueda llevarse a cabo la comprobación experimental de los resultados del análisis efectuado. Esta comprobación está fuera de los límites del presente trabajo por cuestiones de tiempo. La siguiente figura muestra una foto del molde.

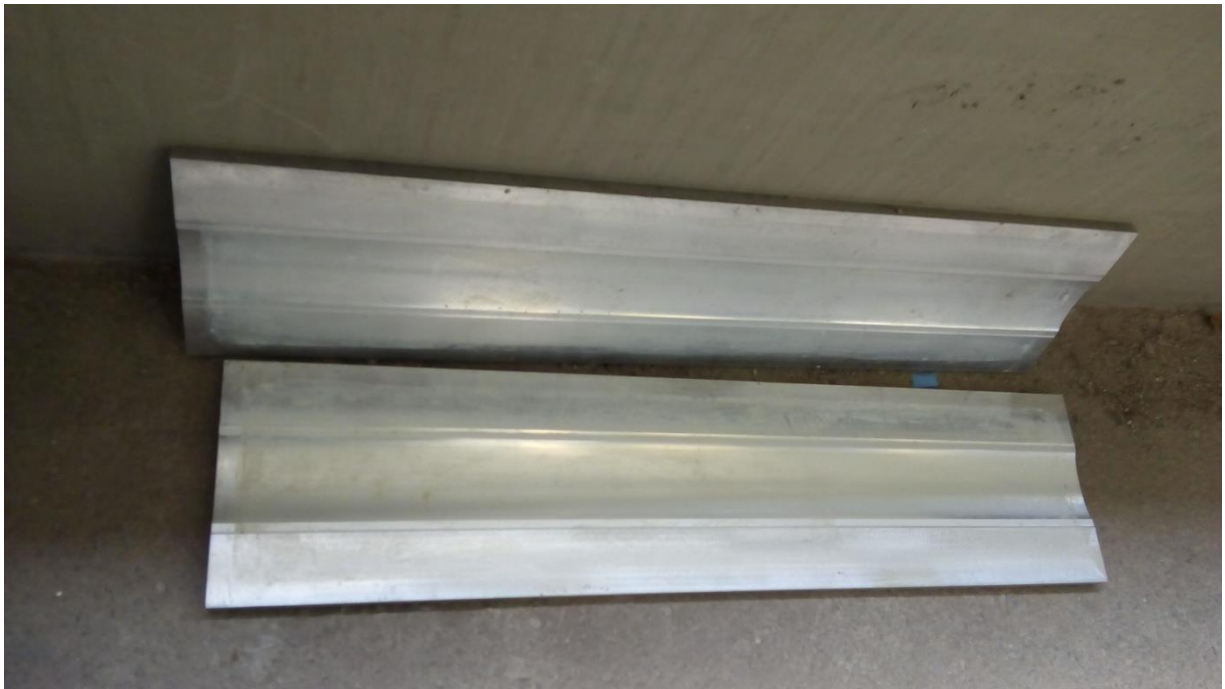


Figura 7. Molde para pala experimental.

Análisis ANSYS ACP™ (Pre)

Este módulo es especialmente utilizado para el análisis de materiales compuestos y laminados. Se comenzó con el diseño de la parte que por conveniencia se llevó a cabo en SOLID WORKS™ para después importarse a ANSYS ACP™ (Pre) y definir las características del material. Para llevar a cabo el análisis de ambos casos tanto el de perfil constante como el de perfil variable la metodología fue similar, se dividió el cuerpo en secciones con la finalidad de obtener un mallado más uniforme así como asegurar la coincidencia de nodos en las uniones. Por conveniencia se utilizaron materiales y propiedades que vienen en el software y se aproximan a los valores reales.

Se procedió a crear las láminas de material del espesor adecuado y la creación del apilamiento para el caso del perfil constante con los datos de los materiales y dimensiones contenidos en el anexo 1. Se crearon las rosetas para definir la orientación de las capas de material, para los análisis con Shear Web se crearon 3 rosetas, para los demás casos solamente 2 rosetas. Se crearon los grupos de orientación del material que consiste en seleccionar los elementos con las rosetas adecuadas y definir la dirección en que se irán acoplando. Finalmente se definieron los grupos de modelado que define las capas que constituirán cada superficie y el número de capas de cada una.

Análisis ANSYS Structural™

El análisis estructural consta de 3 puntos principales:

- a) **Definición de soporte fijo:** Para el perfil constante se eligió un extremo. Para el perfil variable se eligió la sección A.
- b) **Definición de fuerzas:** Para el perfil fijo se aplicaron 3 fuerzas de 50N, 100N y 150 N en el extremo libre para cada uno de los 4 diferentes refuerzos. El perfil variable se dividió en 21 secciones verticales que se muestran en la figura XX, las cargas para el perfil variable se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Cargas aplicadas para cada sección del perfil con sección transversal variable.

Ubicación	[-Z]		[Y]	Ubicación	[-Z]		[Y]
	Fuerza Empuje [N]	Tangencial [N]	Resultante [N]		Fuerza Empuje [N]	Tangencial [N]	Resultante [N]
1-A	Fixed	Fixed	Fixed	11-K	14.271	2.743	14.532
2-B	19.924	10.806	22.666	12-L	13.498	2.408	13.711
3-C	20.611	9.44	22.670	13-M	12.786	2.127	12.962
4-D	20.448	8.064	21.981	14-N	12.129	1.889	12.275
5-E	19.802	6.834	20.948	15-O	11.521	1.686	11.644
6-F	18.918	5.79	19.784	16-P	10.955	1.51	11.059
7-G	17.941	4.923	18.604	17-Q	10.423	1.358	10.511
8-H	16.955	4.211	17.470	18-R	9.915	1.223	9.990
9-I	16.003	3.626	16.409	19-S	9.408	1.101	9.472
10-J	15.106	3.143	15.430	20-T	8.843	0.983	8.897
-	-	-	-	21-U	5.61	0.588	5.641

- c) **Solución:** Se seleccionaron como criterios de solución la deformación total, deformación direccional, y se puso una probeta en la orilla móvil para medir el desplazamiento.

Proceso para el perfil con sección transversal variable.

Dado que para el perfil variable no se estableció un tipo de refuerzo y construir uno a lo largo de la pieza es complicado, se optó por reforzar parcialmente tanto el área superior como el área inferior cubriendo solamente algunas de las secciones, es decir, usando Spar Caps parciales.

Para llevar a cabo el análisis y conseguir el objetivo de se creó la siguiente tabla XX donde se muestran 22 eventos diferentes. Algunos ejemplos se citan a continuación.

Tabla 3. Refuerzos aplicados para analizar el perfil variable.

	Superficie		Refuerzo		
	Capa Superior	Capa Inferior	Sección Reforzada	Capas Superiores	Capas Inferiores
Evento 1	2	2	-	-	-
Evento 2	3	3	-	-	-
Evento 3	2	2	A - B	1	1
Evento 4	2	2	A - B	2	2
Evento 5	2	2	A - B	3	3
Evento 6	3	3	A - B	1	1
Evento 7	3	3	A - B	2	2
Evento 8	2	2	A - C	1	1
Evento 9	2	2	A - C	2	2
Evento 10	2	2	A - C	3	3
Evento 11	3	3	A - C	1	1
Evento 12	3	3	A - C	2	2
Evento 13	2	2	A - D	1	1
Evento 14	2	2	A - D	2	2
Evento 15	2	2	A - D	3	3
Evento 16	3	3	A - D	1	1
Evento 17	3	3	A - D	2	2
Evento 18	2	2	A - E	1	1
Evento 19	2	2	A - E	2	2
Evento 20	2	2	A - E	3	3
Evento 21	3	3	A - E	1	1
Evento 22	3	3	A - E	2	2

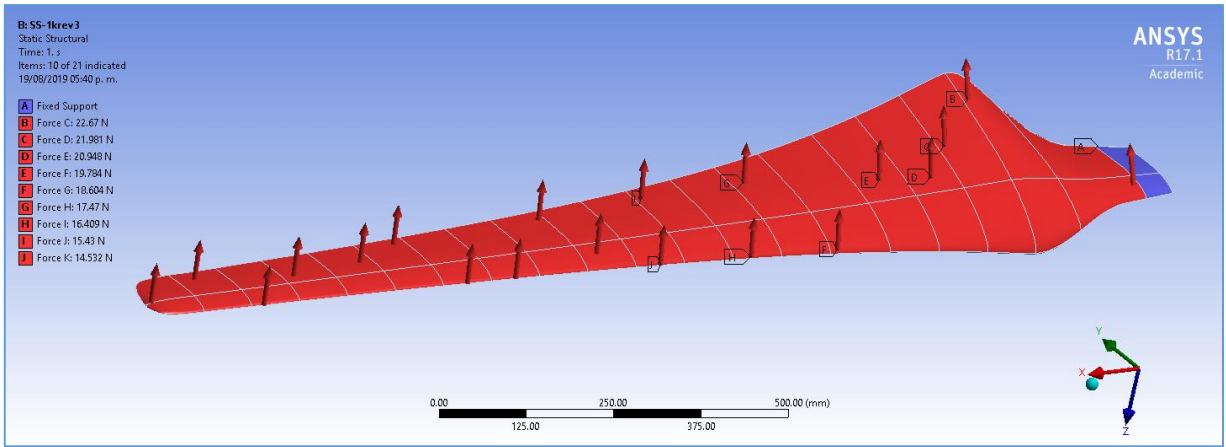


Figura 8. Imagen con la aplicación de las fuerzas para el perfil de sección transversal variable.

Resultados

Resultados para perfil de sección transversal constante.

La compilación de resultados para el perfil constante agrupa los siguientes eventos:

- 4 Tipos de Refuerzo
- 3 Diferentes Fuerzas

El resultado son 12 valores de desplazamiento los cuales una vez agrupados se muestran en la tabla 4. El desplazamiento está dado en milímetros y el valor es negativo porque es descendente.

Tabla 4. Compilación de datos para el perfil constante. Desplazamientos en [mm].

Tipo	FUERZA APLICADA					
	50 N	% reducción	100 N	% reducción	150 N	% reducción
Hueco	-89.351	-	-178.7	-	-268.05	
Web	-80.914	9.4	-161.83	9.4	-242.74	9.4
Spar Cap	-75.482	15.5	-150.96	15.5	-226.45	15.5
Web & Spar Cap	-69.165	22.6	-138.24	22.6	-207.37	22.6

Graficando los resultados obtenidos obtenemos un comportamiento lineal para cada refuerzo analizado, en el eje horizontal se encuentran las fuerzas aplicadas, el eje vertical muestra el desplazamiento del punto axial en milímetros.

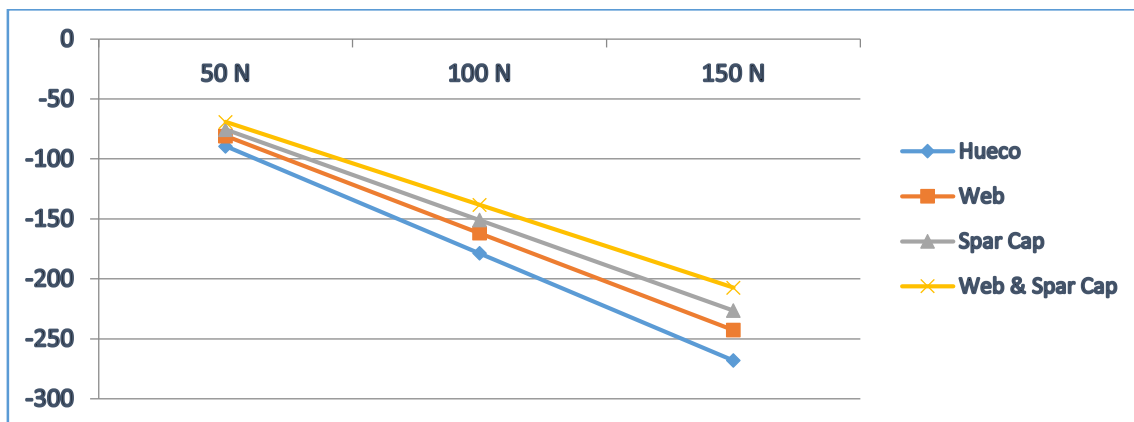


Figura 9. Gráfica de datos para el perfil constante.

Como puede apreciarse, el desplazamiento máximo para la aplicación de cada fuerza ocurre con el perfil hueco, mientras que el desplazamiento menor se consigue cuando se emplea el refuerzo conjunto del Shear Web con el Spar Cap. Como detalle adicional, cabe mencionar que el uso de Spar Caps proporciona mayor oposición al desplazamiento de la punta que el uso de Shear Web.

A continuación se muestran 4 desplazamientos representativos de la Tabla XX que muestran los valores máximos y mínimos obtenidos para las fuerzas aplicadas de 50 N y 150 N.

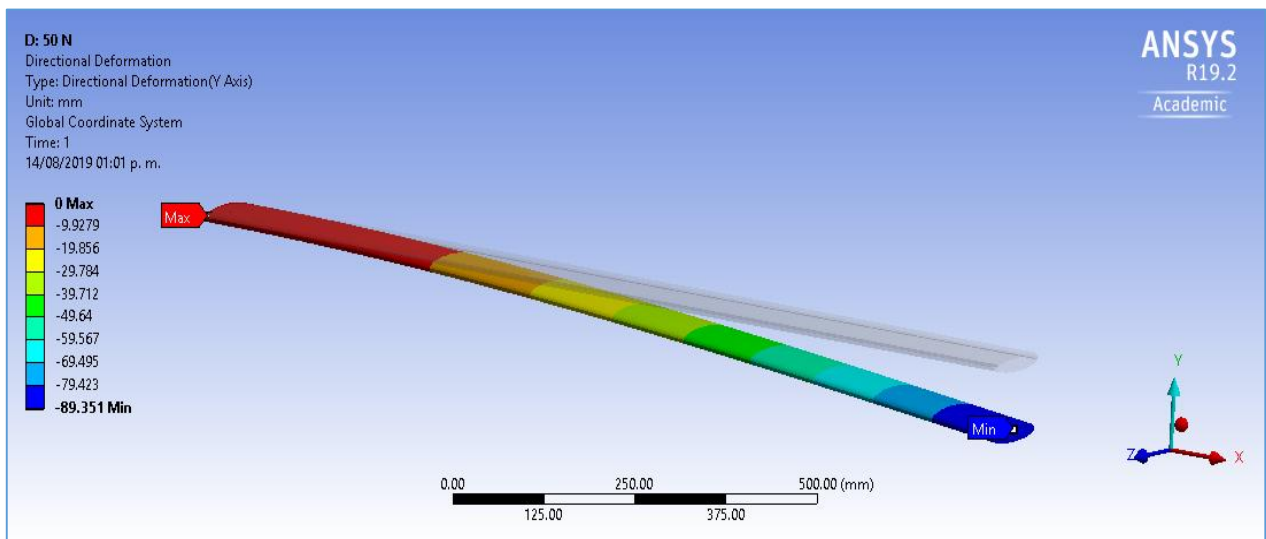


Figura 10. Perfil hueco sin refuerzos. Fuerza = 50 N.
Deformación Direccional = 89.351 mm

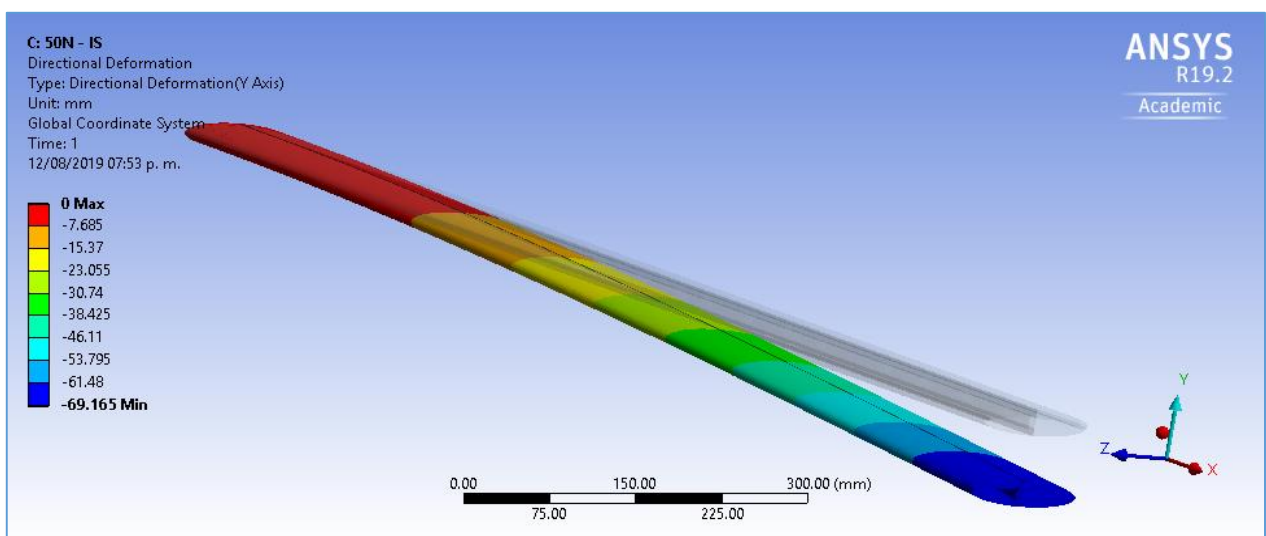


Figura 11. Perfil reforzado con Spar Caps y Shear Web. Fuerza = 50 N.
Deformación Direccional = 69.165 mm

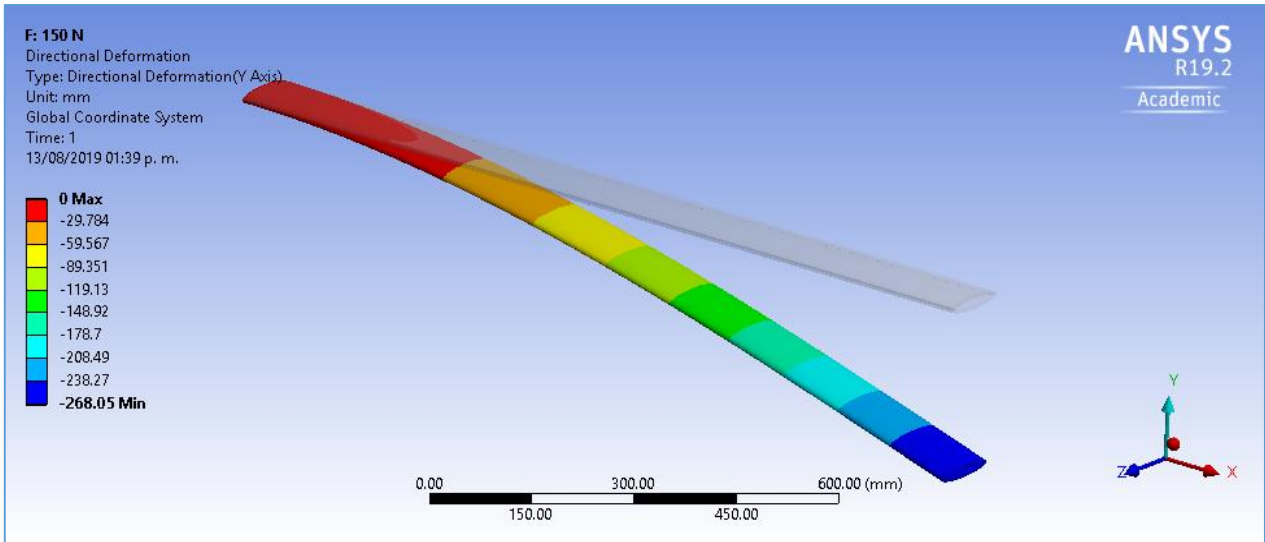


Figura 12. Perfil hueco sin refuerzos. Fuerza = 150 N
 Deformación Direccional = 268.05 mm

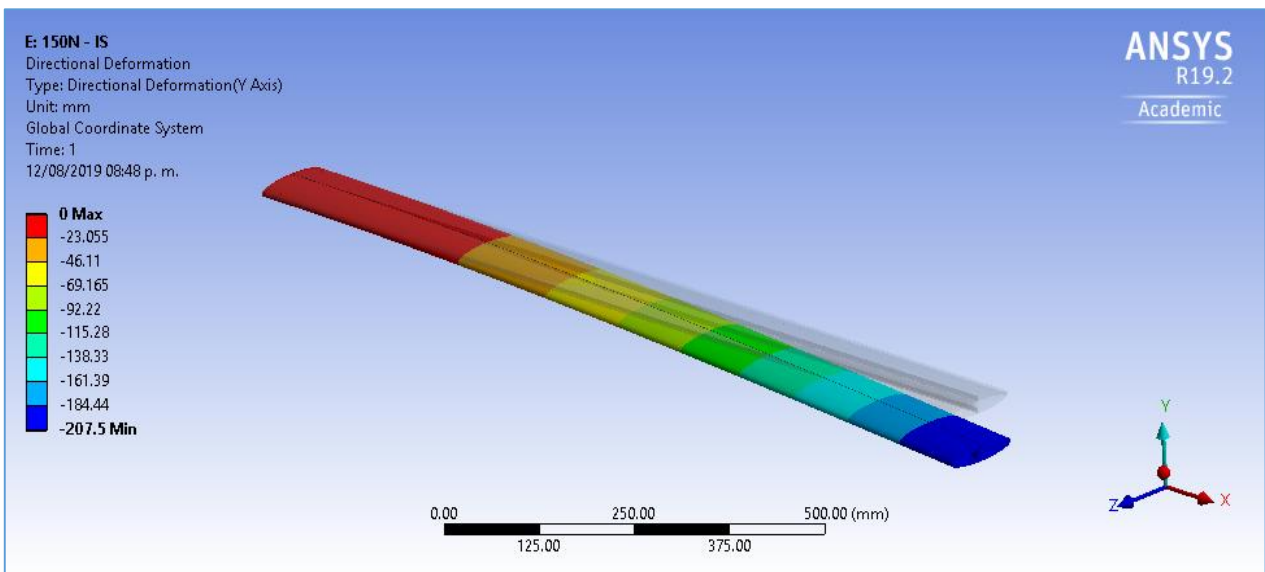


Figura 13. Perfil reforzado con Spar Caps y Shear Web. Fuerza = 150 N
 Deformación Direccional = 207.5 mm

Resultados para perfil variable.

El caso 1 de la Tabla XX se tomó como referencia para establecer el porcentaje de reducción en el desplazamiento de la orilla al utilizar los refuerzos o las capas adicionales descritos en esa misma tabla. La Tabla XX muestra los resultados obtenidos para los 22 eventos analizados. Como puede apreciarse, mientras más refuerzos se aplican se obtiene un menor desplazamiento de la orilla libre.

Tabla 5. Resultados obtenidos para los eventos analizados del perfil variable.

	Superficie		Refuerzo			Resultados	
	Capa Superior	Capa Inferior	sección	Capas superiores	Capas inferiores	Despl. [mm]	Porcentaje de Mejora
Caso 1	2	2	-	-	-	-244.54	-
Caso 2	3	3	-	-	-	-138.99	43.38%
Caso 3	2	2	A - B	1	1	-173.13	29.28%
Caso 4	2	2	A - B	2	2	-134.6	45.07%
Caso 5	2	2	A - B	3	3	-111.09	54.71%
Caso 6	3	3	A - B	1	1	-108.87	55.52%
Caso 7	3	3	A - B	2	2	-89.227	63.58%
Caso 8	2	2	A - C	1	1	-151.51	38.07%
Caso 9	2	2	A - C	2	2	-111.78	54.33%
Caso 10	2	2	A - C	3	3	-89.583	63.44%
Caso 11	3	3	A - C	1	1	-100.36	58.98%
Caso 12	3	3	A - C	2	2	-79.304	67.55%
Caso 13	2	2	A - D	1	1	-145.7	40.47%
Caso 14	2	2	A - D	2	2	-104.54	57.32%
Caso 15	2	2	A - D	3	3	-82.586	66.32%
Caso 16	3	3	A - D	1	1	-97.782	60.05%
Caso 17	3	3	A - D	2	2	-75.766	69.07%
Caso 18	2	2	A - E	1	1	-144.91	40.80%
Caso 19	2	2	A - E	2	2	-103.29	57.84%
Caso 20	2	2	A - E	3	3	-81.005	66.99%
Caso 21	3	3	A - E	1	1	-138.99	60.23%
Caso 22	3	3	A - E	2	2	-75.052	69.38%

Los resultados de la tabla muestran en amarillo las combinaciones de refuerzos que alcanzan o exceden el 60% de reducción respecto a la referencia. La opción de reforzar solamente 2 secciones A y B demanda al menos una lámina adicional completa para alcanzar este porcentaje.

A continuación se muestran 2 gráficas que representan la disminución en desplazamiento del extremo, la primera en milímetros, la segunda en porcentaje.

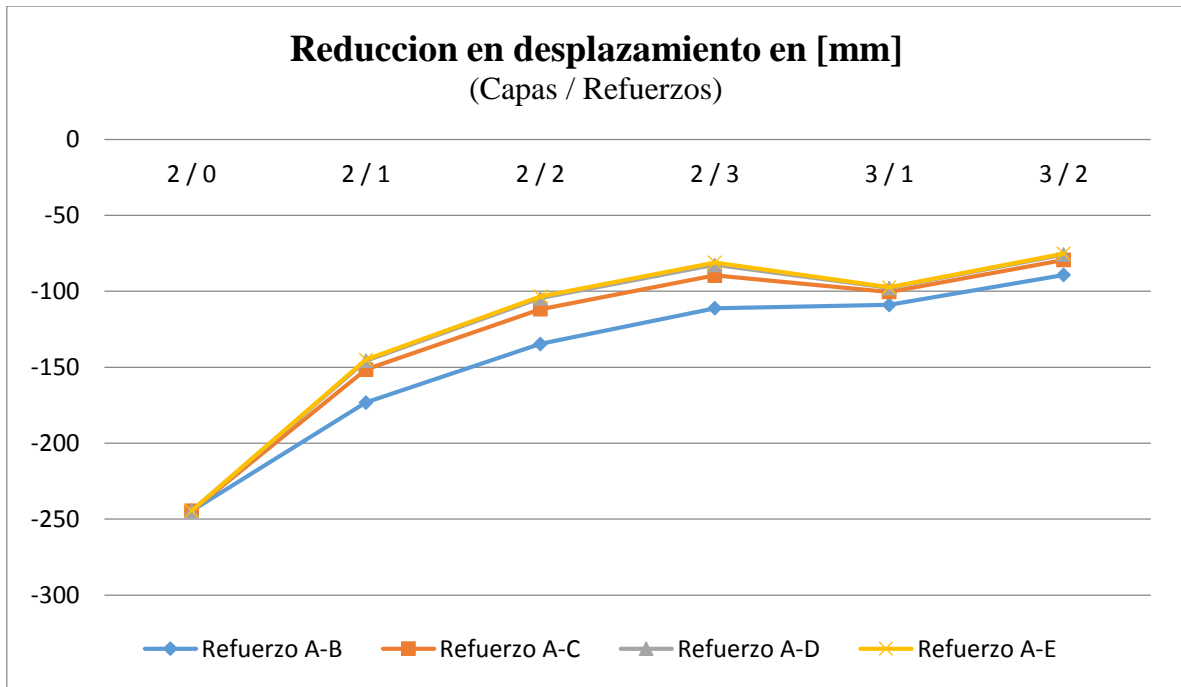


Figura 14. Gráfica de reducción en desplazamiento para el perfil variable por tipo de refuerzo. Desplazamiento en [mm].

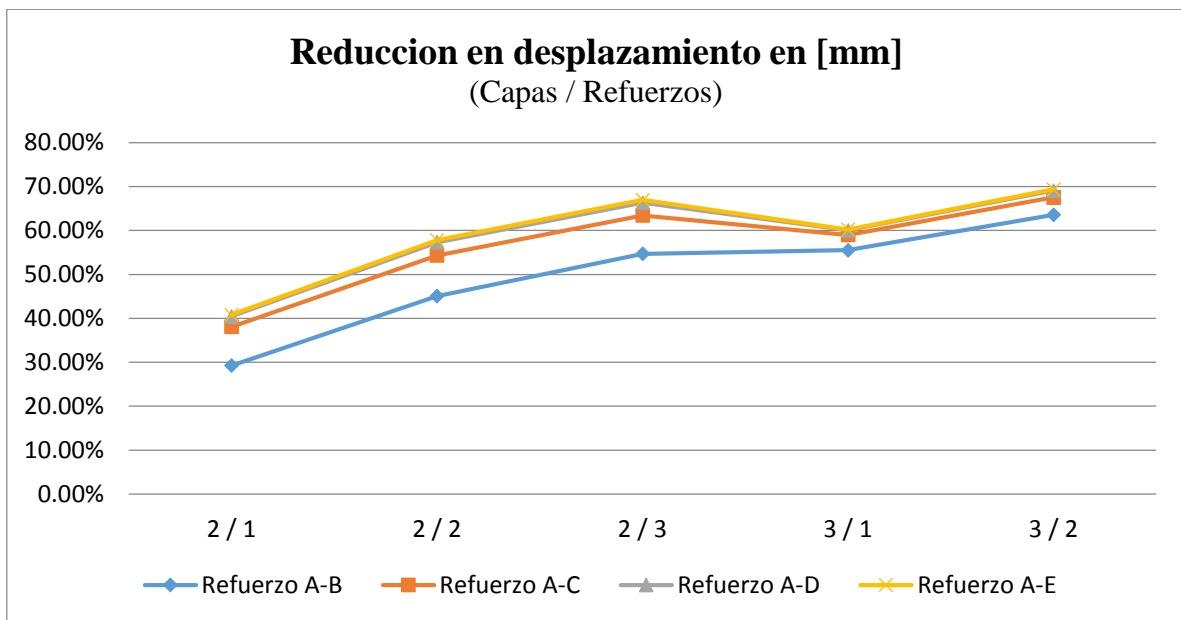


Figura 15. Gráfica de reducción en desplazamiento para el perfil variable por tipo de refuerzo. Desplazamiento en porcentaje.

Una comparación entre los eventos con refuerzos A - D contra los evento A - E muestra que el porcentaje de mejora obtenido entre ambos no es muy grande, es decir, la diferencia entre los casos 13 contra 18, 14 contra 19, etc. no es muy grande, menos del 1% para cada evento. A continuación se muestran 4 desplazamientos representativos de la Tabla XX.

Evento 1 tomado de referencia.

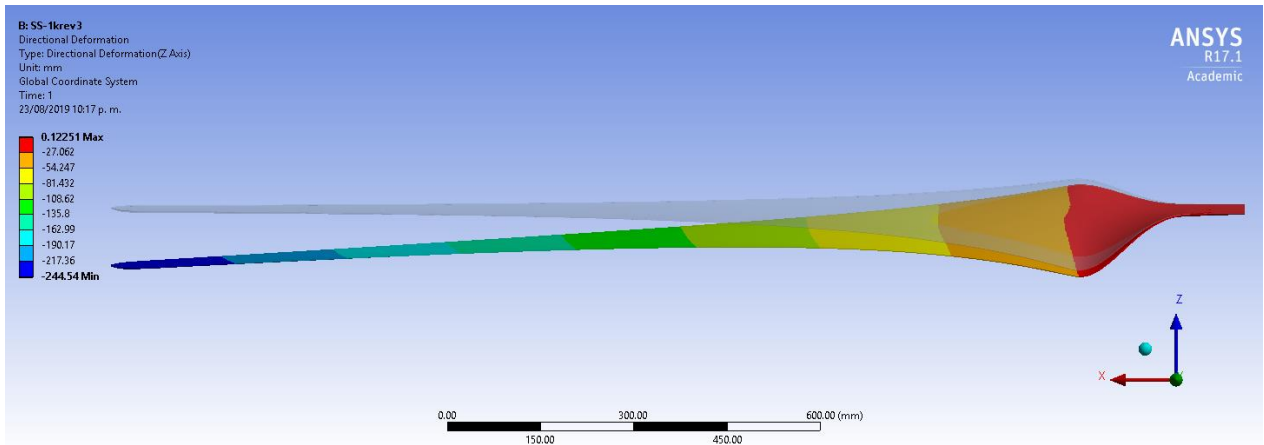


Figura 16. Evento 1. Perfil hueco de 2 capas sin refuerzos.
Deformación Direccional = - 244.54 mm

Evento 7. Único evento para la zona reforzada A y B que excede el 60% de mejora requerido. Demandó una capa completa adicional superior e inferior.

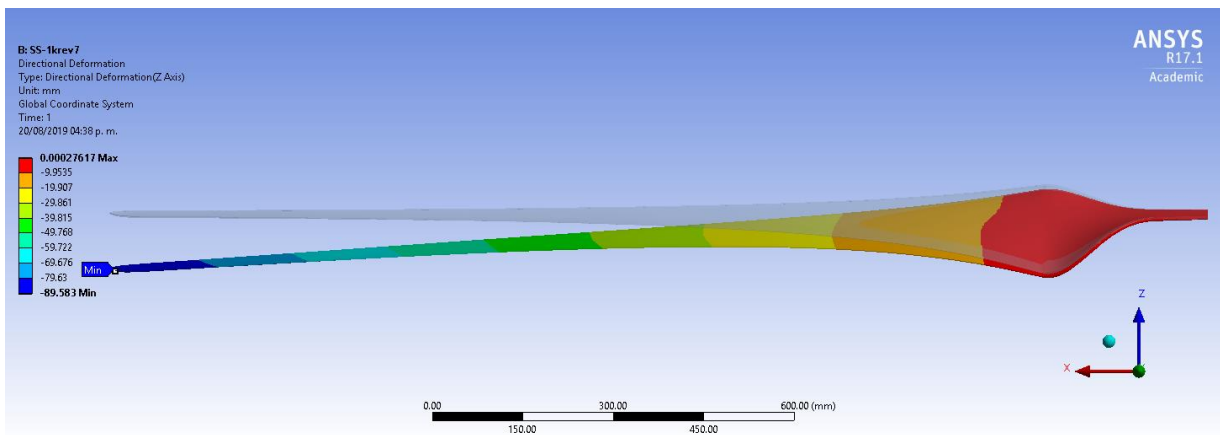


Figura 17. Evento 7. Perfil hueco de 3 capas con 2 refuerzos en las secciones A y B.
Deformación Direccional = -89.227 mm
Disminución de desplazamiento: 63.58%

Evento 10. El primer evento con 2 capas que alcanza el 60 % de mejora en desplazamiento.

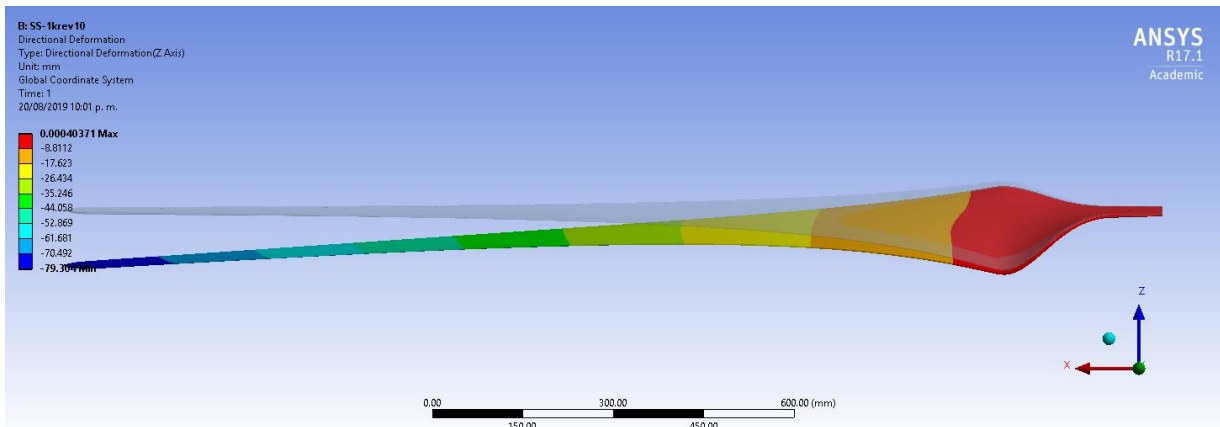


Figura 18. Evento 10. Perfil hueco de 2 capas con 3 refuerzos en la sección A - C.
Deformación Direccional = - 89.583 mm
Disminución de desplazamiento: 63.44%

Evento 17. El evento que casi alcanza el 70 % de mejora en desplazamiento. Segundo evento de los analizados en mejora de desplazamiento.

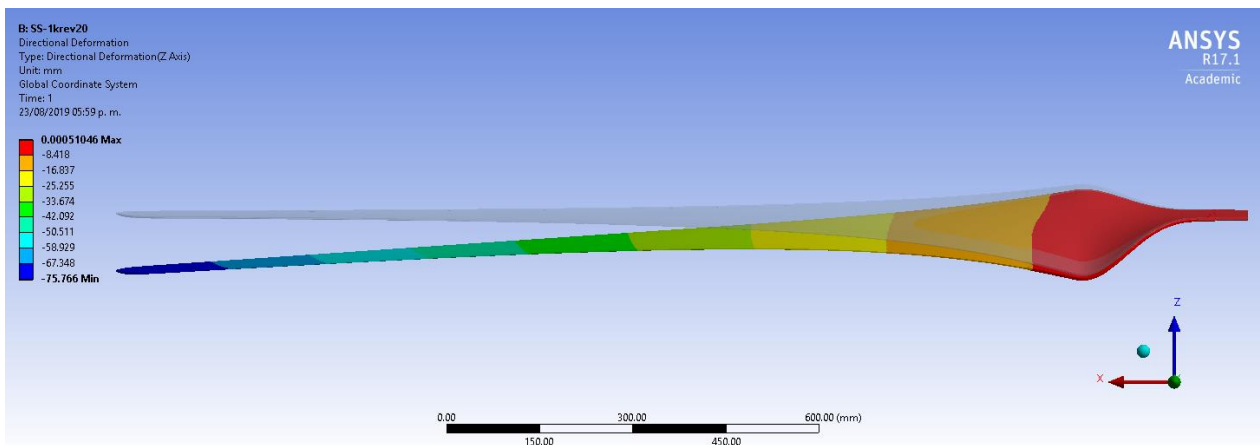


Figura 19. Evento 17. Perfil hueco de 3 capas con 2 refuerzos en la sección A - D.
Deformación Direccional = - 75.766 mm
Disminución de desplazamiento: 69.07%

Como puede apreciarse mientras más refuerzos o capas, mayor disminución del desplazamiento de la orilla.

Conclusiones

Conclusiones generales

Este trabajo se llevó a cabo como un método de introducción al análisis estructural para palas de aerogenerador, si bien hay factores adicionales que tomar en cuenta para un análisis detallado, el presente trabajo logró los objetivos de familiarización con las herramientas de software principales y las bases para llevarlo a cabo.

Para llevar a cabo este proyecto se siguió la metodología sugerida por el asesor, basada en los requerimientos fundamentales para involucrarse en el análisis estructural, acompañado de las fuentes citadas en la sección de Referencias.

El análisis fue llevado a cabo de manera satisfactoria, sin embargo, cabe mencionar que hubo complicaciones durante su proceso, esto debido a las diferentes versiones del software de análisis disponibles así como las versiones de los tutoriales consultados y proporcionados, lo que dio como resultado más tiempo de lo esperado en los cálculos así como la necesidad de llevarlos a cabo en más de una ocasión para la mayoría de los eventos propuestos.

Dada la simplicidad de la geometría para el primer caso del perfil con sección transversal constante, el análisis pudo desarrollarse de manera relativamente sencilla con la versión académica del software ANSYS TM, sin embargo, los requerimientos de memoria para el perfil variable, dada su complejidad y el mallado, hubo necesidad de usar el hardware y software disponible en CIDESI.

Como sugerencia para los futuros interesados en integrarse a esta rama de la tecnología, la sugerencia es el temprano y constante involucramiento en las herramientas de análisis, aun cuando esto demanda un esfuerzo adicional si se está cursando la especialidad o un curso propedéutico. Llevar a cabo esta práctica evitará sin duda cometer errores que dan como resultado demoras.

Conclusiones para el perfil constante

Después de analizar los datos obtenidos para el caso de perfil con sección constante, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Todos los perfiles reforzados presentan mejoría en desplazamiento respecto al perfil hueco sin refuerzos.
2. Aplicar Spar Caps Inferior y Superior dio un mejor refuerzo que un Shear Web.
3. La mejora de cada refuerzo muestra un comportamiento lineal respecto al perfil hueco sin refuerzos. Acorde a la figura XX.
4. La mejor opción de refuerzo es la combinación de Shear Web con Spar Caps, que representa más del 22% de mejora en reducción de desplazamiento con respecto al perfil hueco sin refuerzo para este caso específico, acorde a la Tabla XX.

Hay que señalar que este proyecto se enfocó solamente en analizar el desplazamiento en el extremo de una pala, hay otros factores a tomarse en cuenta al llevar a cabo un análisis previo a la elaboración física de una pala.

Conclusiones para el perfil variable

Después de analizar los datos obtenidos para el caso de perfil con sección variable, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Todos los perfiles reforzados presentan mejoría en desplazamiento respecto al perfil hueco sin refuerzos.
2. La diferencia entre reforzar las zonas A-B y A-C es significativa cuando se usan 2 capas, implica una reducción en desplazamiento más del 8 %. Dicho porcentaje de mejora decrece a menos del 4% al usarse 3 capas para esas mismas áreas.
3. La diferencia entre reforzar las zonas A-D y A-E no es muy grande, implica una reducción en desplazamiento menos del 1 % cuando se usan 2 capas y esta mejora decrece a menos del 0.5% para 3 capas. Lo cual indica que la aplicación de más material no necesariamente indica una mejora representativa en desplazamiento.
4. Hubo 9 eventos que reportaron un decremento en desplazamiento mayor o igual al 60%, sin embargo, los que resultan más eficientes en cuanto a la cantidad de refuerzo necesario son el evento 10 y el evento 10 y el evento 15.

Al igual que en el caso de perfil fijo, hay varias consideraciones que deben tomarse en cuenta antes de elaborar un perfil, en este caso, de manera adicional se recopilaron los valores del factor de seguridad y solo los eventos 15, 17, 20 y 22 tuvieron un valor mayor a 1, por lo resultarían más confiables.

Tabla 6. Factor de seguridad de eventos con valor mayor a 1.

	F. de Seguridad	Capas/Refuerzo	Secciones
Evento 15	1.0185	2-3	A-D
Evento 17	1.0408	3-2	A-D
Evento 20	1.0519	2-3	A-E
Evento 22	1.609	3-2	A-E

Resumen

Analizando los resultados:

Para el primer caso del perfil con sección transversal constante, puede apreciarse que el análisis computacional realizado muestra un comportamiento lineal para cada uno de los refuerzos utilizados y el porcentaje de mejora obtenido para cada refuerzo es el mismo independientemente de la fuerza aplicada: Para el Shear Web se obtiene una disminución del desplazamiento de la punta del 9.4%, para el Spar Cap se obtuvo una disminución del 15.5% y para el refuerzo combinado del Spar Cap y el Shear Web se obtuvo el 22.6%. El comportamiento para cada refuerzo con las fuerzas aplicadas está incluido en la Figura 9.

Para el segundo caso, tras analizar los 22 casos expuestos en la tabla 5, con la metodología propuesta se consiguió la disminución del 60% en desplazamiento de la punta en 9 casos.

Al haber establecido un porcentaje de mejora para cada refuerzo y definir un comportamiento para el primer caso del perfil con sección transversal constante, y haber conseguido un porcentaje de reducción del 60% en el perfil de sección transversal variable, se concluye que los objetivos establecidos para ambos casos se cumplieron.

Bibliografía

Riso, Guidelines for Design Wind Turbines Copenhagen, 2002

Hau Erich, Wind Turbines : Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2a Ed. 2005. Springer

Wood David, Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application, 1a Ed. 2011. Springer-Verlag.

Hansen, Martin, Aerodynamics of Wind Turbines. 3a Ed. 2015. Routledge.

IEC, Wind Turbines, Part 1: Design Requirements. International Electrotechnical Commission.

IEC, Wind Turbines, Part 2: Small Wind Turbines. International Electrotechnical Commission.

M.J. Cuesta Santines, Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW. 2008.

Lawrence Kent, ANSYS Workbench Tutorial, 2005, Schroff Development Corporation.

Chen, Liu, Finite Element Simulations with ANSYS Workbench, 2014. CRC Press.

Referencias:

[1] **SENER. Perspectiva de Energías Renovables 2012-2026**

<https://www.gob.mx/sener/>

[2] **World Energy Outlook 2011**

www.iea.org

[3] **The telegraph**

Wind farm turbines wear sooner than expected. www.telegraph.co.uk

[4] **Wind Engineering Power Development**

<https://www.windpowerengineering.com/mechanical/blades/what-researchers-have-learned-from-fractured-wind-turbine-blades>

[5] **ekidom. Energías renovables**

ekidom.com

[6] **World Wind Energy Association**

wwindea.org

[7] **Wind Turbine.**

openei.org

[8] **Accidentes en Aerogeneradores.**

<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics.htm>

[9] **SENER. Beneficios de usar energías renovables.**

<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/beneficios-de-usar-energias-renovables>

[10] **International association of Structural Engineering & Mechanics**

i-asem.org

[11] **A review of wind-turbine structural stability, failure and alleviation.**

International association of Structural Engineering & Mechanics. www.i-asem.org

[12] **GE Reports**

<https://www.ge.com/reports/>

[13] **LM Wind**

<https://www.lmwindpower.com/>

[14] **Wind Power Monthly**

<https://www.windpowermonthly.com/>

[15] **ANSYS™. Engineering Data**

Referencias Adicionales:

Las bases científicas de la energía eólica.

blogs.publico.es/ignacio-martil/2018/07/06

Improved Inspection of Composite Wind Turbine Blades with Accessible, Advanced Ultrasonic Phased Array Technology

Olympus Scientific Solutions Americas Corp. www.olympus-ims.com

Anexos

Anexo 1. Características de palas de aerogenerador

Caso 1. Perfil con sección transversal constante:

Parte	Composición
Shell Superior:	Epoxy Carbon + Honeycomb + Epoxy Carbon
Shell Inferior:	Epoxy Carbon + Honeycomb + Epoxy Carbon
Web:	Epoxy Carbon + Honeycomb + Epoxy Carbon
Spar Cap:	Epoxy Carbon 3 Capas

Propiedades de los materiales^[15]:

Materiales	
Honeycomb	
Young Module X	1 MPA
Young Module Y	1 MPA
Young Module Z	250 MPA
Poisson XY	0.49
Poisson YZ	0.001
Poisson XZ	0.001
Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg	
Young Module X	61340 MPA
Young Module Y	61340 MPA
Young Module Z	6900 MPA
Poisson XY	0.04
Poisson YZ	0.3
Poisson XZ	0.3

Dimensiones:

Stackup (Shear Web):	Espesor	Unidades
Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg	0.286	mm
Honeycomb	6.35	mm
Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg	0.286	mm
Total	6.922	mm
Spar Caps	Espesor	Unidades
Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg	0.286	mm
Total	.858	mm

Caso 2. Perfil con sección transversal variable

Pala de 1.2 kW (Perfil Variable)		Espesor	Unidades
Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg		0.9	mm
	Total	1.8	mm

Espesor de cada capa		Espesor	Unidades
Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg		0.9	mm

Anexo 2. Causas de las principales fallas en palas eólicas. [4]

- Falla en el sistema de control para detectar vibraciones o desbalance.
- Falla en la sujeción al eje lleva a arrojar la pala.
- Cargas de pandeo extremas
- Daño por rayos incluido el ingreso de humedad
- Defectos de manufactura que resultan en la desunión (deterioro de los agentes de unión usados en la interface entre los diferentes elementos estructurales.
- Sobre velocidad de las palas, da como resultado impacto en la torre.
- Eventos ambientales incluyendo peligros naturales
- Diseño incorrecto por cargas de fatiga
- Accidentes con la grúa de mantenimiento durante reparaciones
- Pobre control de manufactura y calidad causando la delaminación (aire atrapado en la pala, pobre infusión o mala resina que lleva a una mala unión.
- Fuego en la góndola que se propaga a las palas.
- Error humano (mal mantenimiento, fallas durante la construcción)

Anexo 3. Beneficios de las energías renovables. [4]

Ambientales:

- Nula emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes que contribuyen al cambio climático
- Ayudan a disminuir enfermedades relacionadas con la contaminación
- No necesitan grandes cantidades de agua para su funcionamiento
- Reducen la necesidad de industrias extractivas en la medida que se evita el uso de combustibles fósiles.
- Pueden reducir la necesidad de proyectos hidroeléctricos de gran escala con los consecuentes efectos de inundación y erosión.

Económicas:

- Reducción de tarifas en servicios de luz, agua, gas.
- Generación de empleos directos (construcción , desarrolladores, diseñadores)
- Generación de empleos indirectos (avicultura, ganadería, servicios)

Sociales:

- Posibilidad de llevar energía eléctrica a comunidades remotas y en la promoción del desarrollo de dichas comunidades.