

**MASTER EN SISTEMAS MECANICOS**

---

**POSGRADO EN INGENIERÍA MECANICA Y DE MATERIALES**



**TRABAJO FIN DE MASTER**

**DISEÑO AERODINAMICO, ESTRUCTURAL Y  
DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE FABRICACIÓN DE  
UNA PALA EN FIBRA DE VIDRIO DE UN  
AEROGENERADOR DE PEQUEÑA POTENCIA.**

**FABIAN RIVEROS MOYANO**

Dirigido por Jesús Cuartero Salafranca  
Zaragoza, septiembre de 2010

# **DISEÑO AERODINAMICO, ESTRUCTURAL Y DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE FABRICACIÓN DE UNA PALA EN FIBRA DE VIDRIO DE UN AEROGENERADOR DE PEQUEÑA POTENCIA.**

---

## **RESUMEN**

Este proyecto aborda el proceso completo de diseño de un rotor de un aerogenerador de pequeña potencia, comenzando por el diseño aerodinámico del rotor que esta demarcado por unos criterios de funcionamiento del aerogenerador, el dimensionado y cálculo de la estructura resistente de cada pala mediante el uso de la herramienta NuMAD y su posterior postprocesado en ANSYS; y la determinación de un sistema de fabricación.

Se ha realizado el análisis aerodinámico completo, desde la selección de los perfiles aerodinámicos, el desarrollo de un código de cálculo y la comprobación mediante un código comercial. A partir de este diseño y cálculo se encuentran las cargas que actúan sobre la pala para realizar el análisis estructural.

Mediante la herramienta de diseño NuMAD, desarrollada por el NREL (National Renewable Energy Laboratory) específicamente para generar una geometría y mallado de palas reduciendo el tiempo y aumentado la confiabilidad mediante un proceso simplificado de creación de un modelo en tres dimensiones, se genera un modelo para elementos finitos que utiliza a ANSYS como postprocesador.

Se realiza el diseño estructural usando un apilado de capas de fibra de vidrio y se comprueba su resistencia ante las cargas de diseño, ante vibraciones y pandeo.

Finalmente se selecciona el método de fabricación, el cual es el RTM.

## TABLA DE CONTENIDO

1. CRITERIOS DE DISEÑO DEL AEROGENERADOR .....	6
2. DISEÑO DE PALA .....	7
2.1 DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL PERFIL NREL 822.....	9
2.2. GEOMETRÍA FINAL .....	11
3. CARGAS SOBRE LA PALA .....	12
3.1. Cargas de cálculo .....	14
4. PREPARACIÓN DEL MODELO EN NuMAD .....	15
4.1 CALCULO DE PALA.....	18
4.1.1. Resistencia a Empuje.....	18
4.1.2. Resistencia a par motor. ....	20
4.1.3. Resistencia ante carga combinada. ....	20
4.1.4. Análisis modal estático y en revolución.....	21
4.1.4. Análisis de pandeo lineal.....	22
5. METODO DE FABRICACIÓN .....	23
6. CONCLUSIONES.....	24
7. BIBLIOGRAFÍA .....	26

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Perfil NREL 822.....	9
FIGURA 2. CI vs $\alpha$ para NREL 822 .....	9
FIGURA 3. CI vs Cd para NREL 822.....	10
FIGURA 4. CI/Cd vs $\alpha$ para NREL 822 .....	10
FIGURA 5. Distribución de presión para $\alpha$ 6° .....	10
FIGURA 6. Distribución de presión para $\alpha$ 12,5°.....	11
FIGURA 7. Perfiles para dibujo en 3D .....	12
FIGURA 8. Perfiles unidos para generar 3D.....	12
FIGURA 9. Apilado en NuMAD .....	16
FIGURA 10. Modelo de pala generado en NuMAD.....	17
FIGURA 11. Selección de tamaño de elemento de malla. ....	17
FIGURA 12 y 13. Modelo y malla.....	17
FIGURA 14 y 15. Detalle de reducción de espesor en bordes. ....	18
FIGURA16. Resultado Criterio de Fallo de TSAI-WU .....	19
FIGURA17. Criterio de TSAI-WU con corte en pala .....	19
FIGURA 18. Desplazamiento ante empuje. ....	20
FIGURA 19. Criterio de TSAI-WU para par motor. ....	20
FIGURA 20. Desplazamientos ante par motor. ....	20
FIGURA 21. Criterio inverso de TSAI-WU para carga combinada.....	21
FIGURA 22. Desplazamientos ante carga combinada.....	21
FIGURA 23, 24 y 25. Deformada ante tres primeros modos.....	22
FIGURA 26. Primer modo de pandeo. ....	23

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Criterios de diseño del rotor.....	7
TABLA 2. Geometría final de pala.....	11
TABLA 3. Resultados de funcionamiento $v=14\text{m/s}$ . ....	13
TABLA 4. Resultados de cargas y potencia $v=14\text{m/s}$ .....	13
TABLA 5. Resultados generales a $v=14\text{m/s}$ .....	14
TABLA 6. Cargas para cálculo de pala. ....	14
TABLA 7. Propiedades de la fibra de vidrio.....	16
TABLA 8. Resultado de frecuencias de análisis modal. ....	22
TABLA 9. Factor de pandeo.....	23

## 1. CRITERIOS DE DISEÑO DEL AEROGENERADOR

A continuación se describen brevemente los criterios que se han tenido en cuenta para el diseño del aerogenerador. En el ANEXO 1 se hace un análisis más exhaustivo de estos criterios.

El diseño de éste aerogenerador se basa en conseguir la maximización de captación energética para una potencia y una velocidad de viento. La potencia elegida es de 5 kW, la cual corresponde a un aerogenerador de pequeña potencia, ideal para uso urbano sobre tejados, para generación aislada de red en zonas agrícolas, carga de baterías, etc.

El número de palas del rotor es de 3, ya que este tipo de aerogenerador cumple con los siguientes criterios:

- Búsqueda de un par de arranque alto para facilitar el funcionamiento a vientos de baja velocidad.
- Estabilidad ante oscilaciones provocadas por el viento.
- Menor velocidad de rotación para disminuir el ruido provocado por las palas.
- Mayor coeficiente de potencia.

Una velocidad nominal con la que la captación energética sea apropiada para los lugares donde se podría utilizar esta turbina. La velocidad que se estima puede cubrir de una manera adecuada con estas condiciones es de 9,8 m/s, ya que en aplicaciones urbanas el recurso eólico no suele ser muy alto.

Finalmente, la velocidad de giro se determina en un proceso iterativo en base a la disposición de velocidades de rotación de generadores comerciales, al radio de pala y al  $\lambda$  (velocidad relativa) que en su conjunto determinan el  $C_p$  (coeficiente de potencia) del aerogenerador.

Para este caso, el resultado de esta selección y sin entrar aun en detalles de la iteración, es una velocidad de giro 200 rpm, la cual corresponde a un  $\lambda$  de 5,88 y a un radio de pala de 2,75 m.

La TABLA 1 muestra los criterios seleccionados que debe cumplir el diseño del rotor del aerogenerador.

TABLA 1. Criterios de diseño del rotor.

Potencia [kW]	P	5
Numero de palas	B	3
Velocidad nominal [m/s]	$V_n$	9,8
Velocidad de Rotación [rpm]	$\omega$	200
lambda	$\lambda$	5,88

En base a estos criterios se realiza el diseño de la pala, buscando un arranque fácil a baja velocidad de viento y un funcionamiento óptimo antes que un alto rendimiento ( $C_P$ ).

## 2. DISEÑO DE PALA

Para la selección del perfil aerodinámico a utilizar en la pala se busca de entre los disponibles los que cumplan con las siguientes consideraciones:

- Numero de Reynolds de diseño del perfil
- Relación L/D
- Comportamiento antes suciedad
- Comportamiento en funcionamiento en pérdida aerodinámica.

El numero de Reynolds de de una pala de aerogenerador se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{Wc}{\nu}$$

Donde,  $W$  es la velocidad relativa incidente;  $c$  es la cuerda y  $\nu$  es la viscosidad cinemática.

Para las condiciones de diseño de pala expuestas el número de Reynolds para cuerdas coherente para este tamaño de pala es de entre  $0,4E6$  y  $0,6E6$ ; por lo tanto se busca un perfil cuyo Reynolds de diseño este en este rango.

En cuanto al comportamiento ante suciedad y la relación  $L/D$ , los perfiles diseñados con fines aeronáuticos suelen tener una relación  $L/D$  muy alta cuando están libres de suciedad e imperfecciones, pero al estar presentes éstas la relación disminuye de manera considerable. En aeronáutica esto no es del todo un inconveniente ya que se programan mantenimientos continuos de los aviones donde incluye limpieza de las alas; por el contrario en un aerogenerador esta sería una operación ocasional y por lo tanto es fundamental contar con un perfil que mantenga sus propiedades aerodinámicas ante la presencia de suciedad.

Existen perfiles especialmente desarrollados para aerogeneradores como son los NREL, RISO o DU los cuales cumplen con la estabilidad antes suciedad.

Finalmente para el caso de rotores a pitch fijo, como lo es el del presente diseño, el control de potencia se consigue mediante la entrada en pérdida del perfil aerodinámico. Esto sucede cuando a partir de un ángulo de ataque el  $L$  disminuye y el  $D$  aumenta permitiendo reducir la potencia entregada por el rotor.

Con base en estas consideraciones se ha seleccionado el perfil NREL 822, el cual tiene un número de Reynolds de diseño de  $0,6E6$  y esta especialmente diseñado para aerogeneradores, es decir cumple con las características de resistencia a suciedad y tiene un comportamiento adecuado a pérdida aerodinámica.

La FIGURA 1 muestra el perfil NREL 822.

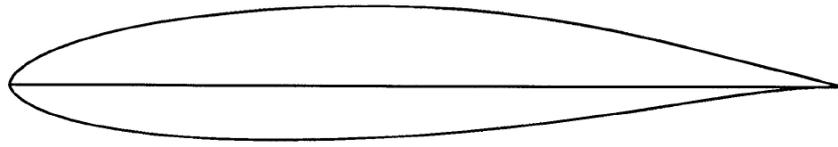


FIGURA 1. Perfil NREL 822

## 2.1 DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL PERFIL NREL 822

Para el cálculo de una pala hace falta contar con las curvas  $C_l$  y  $C_d$  vs  $\alpha$  para diferentes números de Reynolds, información que no suele estar disponible y por lo que debe buscarse en base a la geometría del perfil por medio de programas especializados de aeronáutica.

Debido a que la pala funciona con números de Reynolds diferentes en función de la velocidad del viento incidente, se buscan varias curvas para luego interpolar entre estas con la finalidad de encontrar los coeficientes de trabajo.

Las FIGURAS 2, 3 y 4 muestran respectivamente las curvas  $C_l$  vs  $\alpha$ ,  $C_l$  vs  $C_d$ , y  $C_l/C_d$  vs  $\alpha$  para números de Reynolds comprendidos entre  $0,1E6$  y  $0,6E6$ . De estas curvas se puede ver la dependencia de estos coeficientes con el número de Reynolds y la importancia de determinarlos para utilizarlos en el diseño.

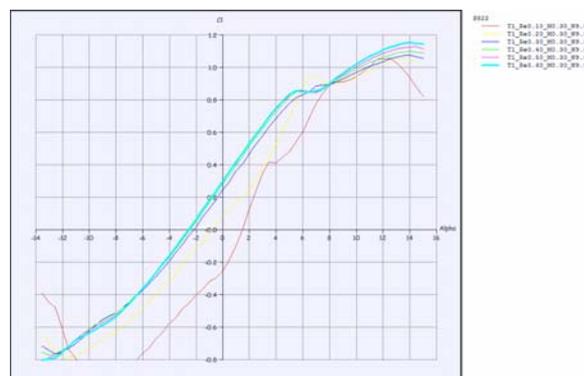


FIGURA 2.  $C_l$  vs  $\alpha$  para NREL 822

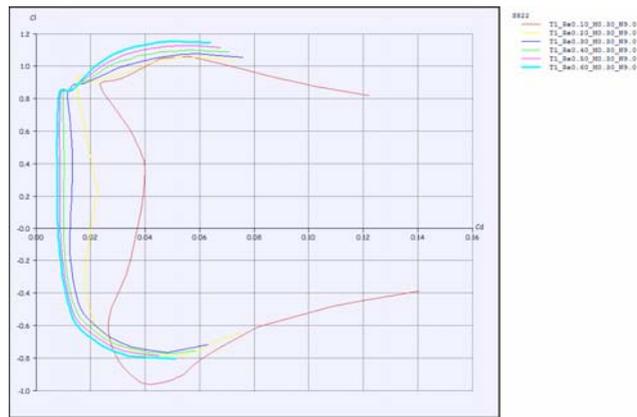


FIGURA 3.  $C_l$  vs  $C_d$  para NREL 822

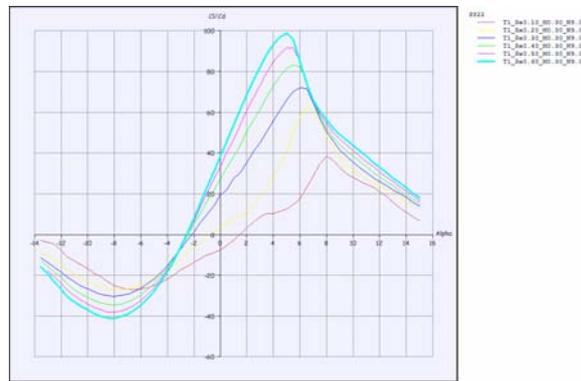


FIGURA 4.  $C_l/C_d$  vs  $\alpha$  para NREL 822

Finalmente y para comparar el comportamiento del perfil a un ángulo óptimo, 6 grados en la FIGURA 5, contra un ángulo en el cual esta en perdida aerodinámica,  $12,5^\circ$  en la FIGURA 6, se muestra las distribución de fuerzas junto con una flecha en dentro del perfil que designa el centro de presiones.

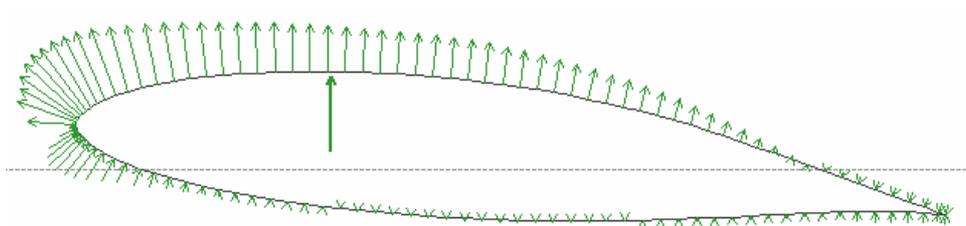


FIGURA 5. Distribución de presión para  $\alpha$   $6^\circ$

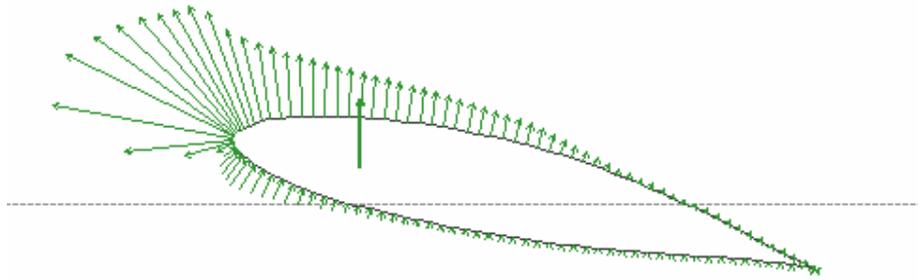


FIGURA 6. Distribución de presión para  $\alpha$  12,5°

## 2.2. GEOMETRÍA FINAL

El proceso iterativo que permite llegar a la geometría de una pala se muestra en el ANEXO 2, este se ha realizado mediante una primera aproximación en un programa que se ha desarrollado en EES mediante el método BEM (blade element momentum) y luego mediante un programa comercial desarrollado por el NREL llamado WT\_PERF, el cual se basa en el método BEM para predecir el funcionamiento de turbinas eólicas, se afina el diseño de la pala. Una vez finalizado el proceso de diseño, la geometría de la pala se muestra en la TABLA 2.

TABLA 2. Geometría final de pala.

Elemento de pala	Radio [m]	calado [grad]	Cuerda [m]
1	0,625	18	0,36
2	0,875	12,4	0,34
3	1,125	8,9	0,32
4	1,375	6,4	0,3
5	1,625	4,4	0,28
6	1,875	3,2	0,25
7	2,125	2,2	0,22
8	2,375	1,3	0,18
9	2,625	0,8	0,12

A partir de ésta tabla ya se puede dibujar la pala. Este proceso se realiza utilizando SolidWorks en el cual se dibuja el perfil cada perfil en su radio correspondiente, con su tamaño de cuerda y su calado. La FIGURA 7 muestra

una vista desde la raíz hacia la punta de la pala de los 9 perfiles con sus correspondientes ángulos de calado y tamaño.

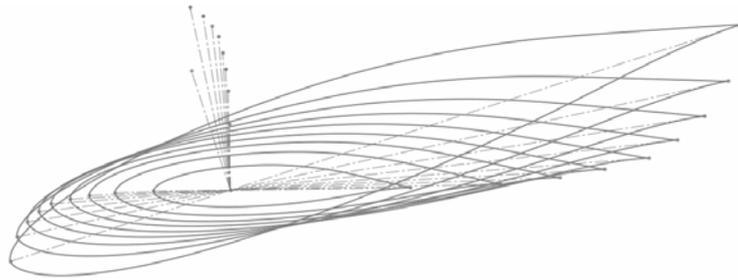


FIGURA 7. Perfiles para dibujo en 3D

La FIGURA 8 muestra una vista desde la punta hacia la raíz con el perfil en 3D ya generado.

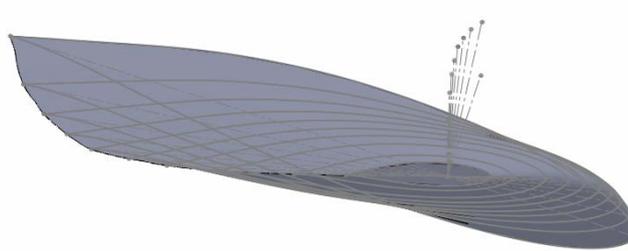


FIGURA 8. Perfiles unidos para generar 3D

### 3. CARGAS SOBRE LA PALA

Las cargas utilizadas para calcular la pala se determinan a partir de la velocidad de diseño. Esta velocidad es 1,4 veces la velocidad nominal. Para este aerogenerador la velocidad nominal es 9,8 m/s y se utilizará como velocidad de diseño 14 m/s que es un poco superior al criterio de diseño pero es un número entero que facilita el uso de los programas de cálculo para la determinación de las cargas.

Para determinar las cargas se utiliza el WT\_PERF, el cual genera dos archivos de resultados; el primero contiene la potencia,  $C_p$ , torque, momento flector para diferentes velocidades de viento del rotor del aerogenerador; y el segundo archivo contiene resultados para cada uno de los elementos de pala para diferentes velocidades de viento, ó rotación, ó ángulo de pitch dependiendo de lo solicitado al programa. Para cada elemento se obtiene la velocidad relativa,

el número de Reynolds, la inducción axial, la inducción tangencial, el ángulo de ataque, el Cl, el Cd, el coeficiente de empuje y la potencia.

En el ANEXO 7 se muestra el archivo de entrada del WT\_PERF, el cual contiene toda la geometría de la pala y las condiciones de funcionamiento del aerogenerador.

El resultado para una velocidad de 14 m/s en cada uno de los elementos de pala se muestra en las TABLAS 3 Y 4. En la Tabla 3 aparecen los valores de funcionamiento, como es la velocidad local (velocidad relativa del elemento), el Numero de Reynolds, las inducciones (a y a'), el ángulo de flujo ( $\varphi$ ), el ángulo de ataque ( $\alpha$ ), y los coeficientes eólicos de sustentación y arrastre.

TABLA 3. Resultados de funcionamiento v=14m/s.

Elemento	Vel Local	Re	Inducc. Axial	Inducc. Tang	Angulo de flujo	AlfaD	Cl	Cd
(-)	(m/s)	(-)	(-)	(-)	[deg]	[deg]	(-)	(-)
1	18,1	0,444	0,35	0,192	30,26	12,26	1,527	0,082
2	22,5	0,523	0,201	0,067	29,77	17,37	1,352	0,144
3	27	0,59	0,202	0,044	24,43	15,53	1,339	0,103
4	31,7	0,65	0,22	0,033	20,16	13,76	1,332	0,068
5	36,5	0,699	0,221	0,025	17,37	12,97	1,246	0,049
6	41,5	0,708	0,212	0,018	15,42	12,22	1,174	0,038
7	46,5	0,698	0,209	0,014	13,78	11,58	1,118	0,031
8	51,5	0,633	0,206	0,011	12,46	11,16	1,065	0,028
9	56,6	0,464	0,214	0,009	11,22	10,42	0,981	0,025

En la TABLA 4 aparecen los valores que se utilizarán para calcular la pala, como son el empuje y el Par. También se presentan sus respectivos coeficientes junto con el coeficiente de potencia y la potencia general en el rotor.

TABLA 4. Resultados de cargas y potencia v=14m/s.

Elemento	Coef Empuje	Coef Torque	Coef Cp	Empuje/Long	Par/Long	Pot
(-)	(-)	(-)	(-)	[N/m]	[N]	[kW]
1	0,623	0,32	0,299	97,9	31,4	0,494
2	0,599	0,263	0,344	131,7	50,6	0,795
3	0,638	0,233	0,392	180,5	74,1	1,164
4	0,68	0,211	0,434	235,1	100,2	1,574

5	0,675	0,182	0,444	275,6	121,1	1,903
6	0,638	0,154	0,432	300,8	136,2	2,139
7	0,596	0,129	0,409	318,3	146,1	2,295
8	0,513	0,099	0,353	306,1	140,9	2,213
9	0,345	0,059	0,232	227,5	102,5	1,61

Cabe señalar que excepto la potencia que es para el rotor con sus 3 palas, todos los demás resultados son para cada pala.

Igualmente de resultados se obtiene las cargas generales a 14 m/s. Estas se muestran en la TABLA 5.

TABLA 5. Resultados generales a  $v=14\text{m/s}$ .

Velocidad	Potencia	Cp	Par motor	Momento de flexión en pala	Empuje
[m/s]	[kW]	(-)	[kNm]	[kNm]	[kN]
14	14,188	0,3553	0,677	0,67	1,555

En estos resultados la potencia, Cp, par motor y empuje son para el rotor con sus 3 palas, por su parte, el momento de flexión es por cada pala.

### 3.1. Cargas de cálculo

Las cargas sobre la pala, son por lo tanto dos, una la que genera el par motor y otra la que genera el empuje axial. Éstas aplicadas sobre el centro de cada elemento se muestran en la TABLA 6.

TABLA 6. Cargas para cálculo de pala.

Elemento	F. Par motor [N]	Empuje [N]
1	12,56	24,48
2	14,46	32,93
3	16,47	45,13
4	18,22	58,78
5	18,63	68,90
6	18,16	75,20
7	17,19	79,58
8	14,83	76,53
9	9,76	56,88

El ANEXO 3 muestra la comprobación de que los valores obtenidos para los elementos de la TABLA 4 dan como resultado los valores generales para el rotor de la TABLA 5 y que por lo tanto los valores son coherentes.

#### **4. PREPARACIÓN DEL MODELO EN NuMAD**

El “Sandia National Laboratories”, ha desarrollado la herramienta NuMAD (Numerical Manufacturing And Design) en un esfuerzo para reducir el costo de energía y mejorar la confiabilidad de los sistemas eólicos a través del diseño y manufactura de palas.

Este programa ha sido desarrollado para simplificar ampliamente el proceso de crear un modelo en 3D de elementos finitos para una pala de una turbina eólica moderna. NuMAD utiliza bases de datos de perfiles y materiales para reducir significativamente el tiempo requerido para la creación de un modelo. Es un programa autónomo con preprocesador gráfico que genera un archivo para ser calculado en el postprocesador de ANSYS.

NuMAD traslada la información geométrica a ANSYS para crear dentro de este un modelo basado en key points, líneas, áreas e información del mallado. Para este estudio se genera un malla utilizando los elementos de “8-Node Structural Shell (Shell 281)” que es un elemento que puede ser usado para modelar materiales compuestos en laminas o construcciones en sándwich; también es adecuado para aplicaciones lineales, grandes rotaciones y/o grandes deformaciones no lineales.

El diseño estructural de la pala se realiza en fibra de vidrio. Para esto, y según es un procedimiento habitual en palas de aerogeneradores, se utiliza una capa exterior de Random Mat, unas capas de fibra a  $+45^\circ$ , unas capas unidireccionales y de nuevo unas capas a  $+45^\circ$ . El porcentaje de fibras unidireccionales con relación a las  $+45^\circ$  es de 60%-40% respectivamente.

Las propiedades de los materiales utilizados se muestran en la TABLA 7. Cada capa tiene un espesor de 0,3mm.

TABLA 7. Propiedades de la fibra de vidrio

Material	E1 [GPa]	E2 [GPa]	G12 [GPa]	v12	X=X' [MPa]	Y=Y' [MPa]	Sxy [MPa]	Densidad [kg/m3]
MAT	7.85	7.85	4	0.3	80	80	35	1690
UNI	48.2	11.7	6.48	0.3	360	60	135	1744

En este caso, por ser una pala pequeña, de 2,75 m, se utiliza un solo espesor para toda la pala. La configuración del apilado, tal como se muestra en NuMAD, se muestra en la FIGURA 9.



FIGURA 9. Apilado en NuMAD

Tal como se puede ver, la capa exterior es de MAT, luego va una de  $+45^\circ$ , seguida por 6 de UNI a  $0^\circ$  (en dirección de la pala) y seguido en la parte interior por otra capa de  $+45^\circ$ . El resultado es 60% unidireccional y 40% de  $+45$  con un espesor total de 3,3 mm.

A continuación se genera la geometría tal como lo muestra la FIGURA 10. En este proceso se adicionan los elementos de pala con su perfil y su calado, a la vez que se asigna el material par cada una de las regiones. En este caso toda la pala tiene el mismo material con el mismo espesor.

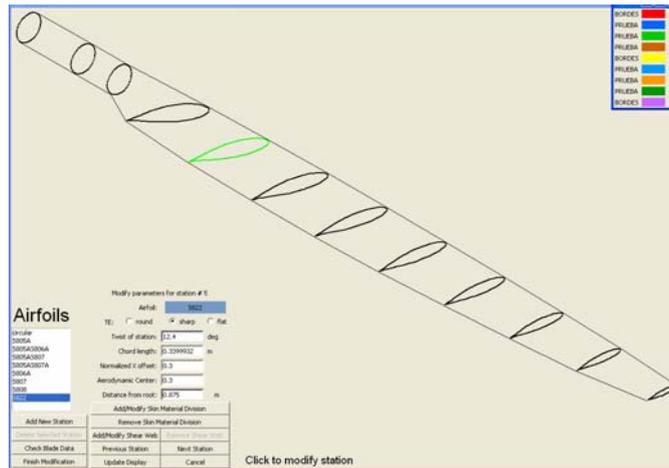


FIGURA 10. Modelo de pala generado en NuMAD.

En este momento se puede generar el modelo en ANSYS, para lo cual se indica en NuMAD tal como lo muestra la FIGURA 11. El tamaño de elemento que se encuentra es adecuado es de 0,015 m.

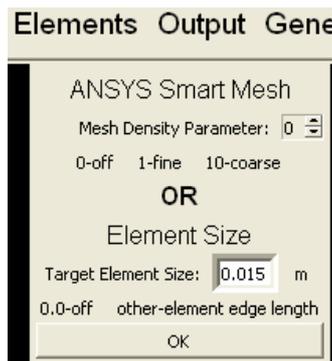


FIGURA 11. Selección de tamaño de elemento de malla.

NuMAD genera de esta manera el modelo en ANSYS, la geometría obtenida se muestran en la FIGURA 12 y 13.

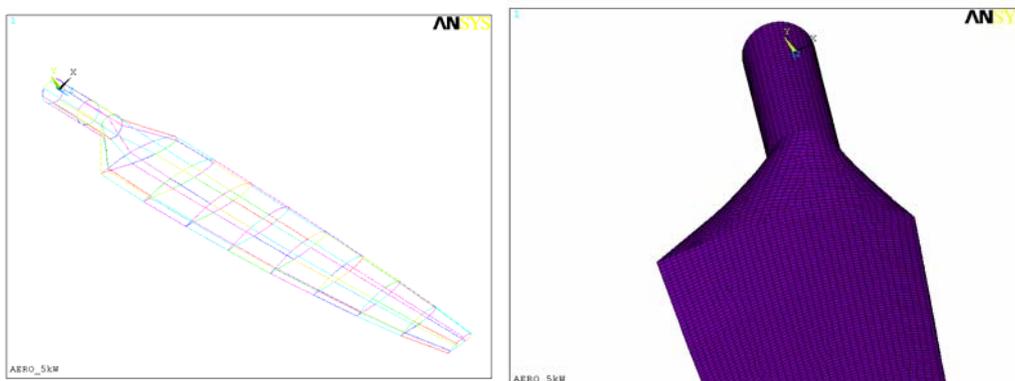


FIGURA 12 y 13. Modelo y malla.

Debido a que en el borde de ataque y de fuga el radio es muy pequeño, el programa da error de mallado por tener un espesor muy grande y no lo puede mallar. Este es un problema común en mallado de palas que se soluciona dando un espesor menor a en esta región (solo para calculo, no en la fabricación). El resultado del mallado en esta sección se muestra en las figuras 14 y 15.

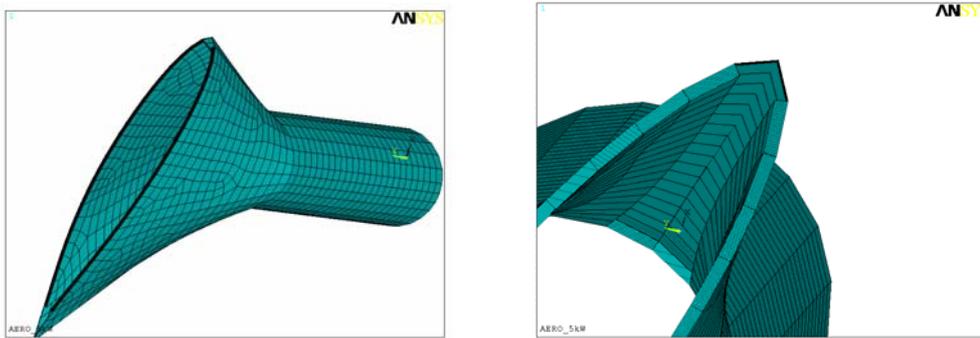


FIGURA 14 y 15. Detalle de reducción de espesor en bordes.

Esta reducción puede dar problemas al calcular la resistencia en esta sección, pero es necesario para realizar el cálculo.

Mas detalles del mallado, geometría y de las propiedades mecánicas de la pala se pueden ver en el ANEXO 4.

#### 4.1 CALCULO DE PALA

En ANSYS se realizan las comprobaciones de: calculo estructural a carga de empuje, a carga de par motor y a combinación de éstas dos; calculo modal en estático; calculo modal en rotación y calculo de pandeo. Todos los cálculos se realizan con la pala en voladizo.

##### 4.1.1. Resistencia a Empuje.

Con las cargas de la TABLA 6 se realiza el cálculo. La FIGURA 16 muestra el resultado del criterio de fallo inverso de TSAI-WU según los valores de resistencia de cada material de la TABLA 7.

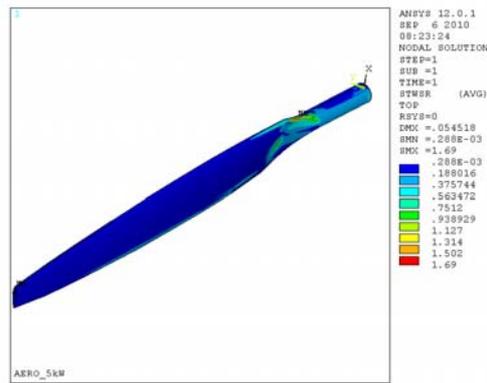


FIGURA16. Resultado Criterio de Fallo de TSAI-WU

El valor máximo es 1.6, lo que indica fallo en esta zona, pero tal como ya se ha comentado el espesor en el borde de ataque es 5 veces menor para poder realizar el cálculo, por lo que se espera que con el espesor real no de problema. Para realizar esta comprobación se calcula de nuevo quitando por completo los elementos de esta zona, es decir haciendo un corte de material a la pala. El resultado se muestra en la FIGURA 17.

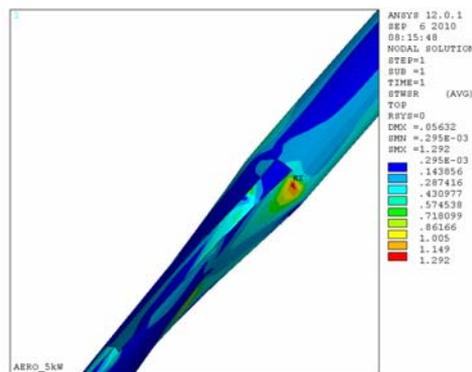


FIGURA17. Criterio de TSAI-WU con corte en pala

En este caso el valor máximo baja a 1.2 porque las tensiones se concentran justo al lado del corte debido a la falta de material. Es de esperar que con el material con el espesor correcto la tensión se reparta sobre toda el área y el índice de TSAI-WU sea menor de 1.

La FIGURA 18 muestra los desplazamientos, el cual tiene un valor máximo de 54 mm.

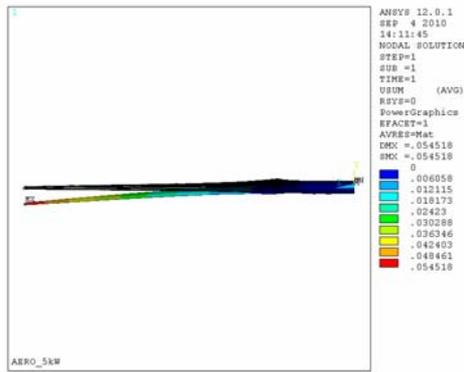


FIGURA 18. Desplazamiento ante empuje.

#### 4.1.2. Resistencia a par motor.

La FIGURA 19 muestra los resultados criterio de fallo inverso de TSAI-WU, el cual tiene un valor máximo de 0.37, aún con el material delgado en bordes.

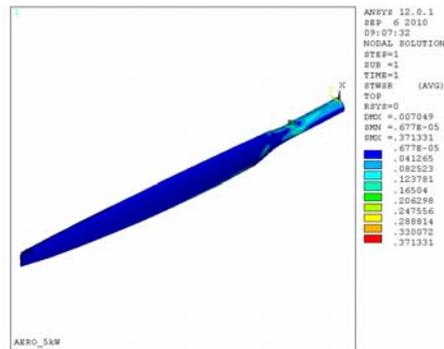


FIGURA 19. Criterio de TSAI-WU para par motor.

La FIGURA 20 muestra el desplazamiento obtenido, el cual tiene un máximo de 7 mm.

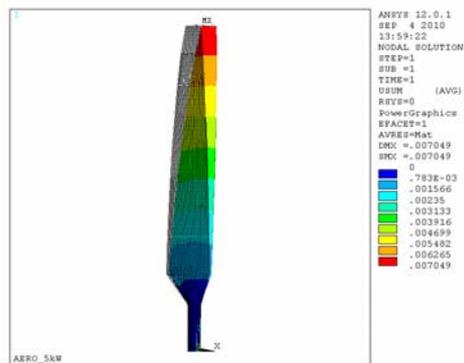


FIGURA 20. Desplazamientos ante par motor.

#### 4.1.3. Resistencia ante carga combinada.

La FIGURA 21 muestra el criterio inverso de TSAI-WU, donde el valor máximo es de 1.6.

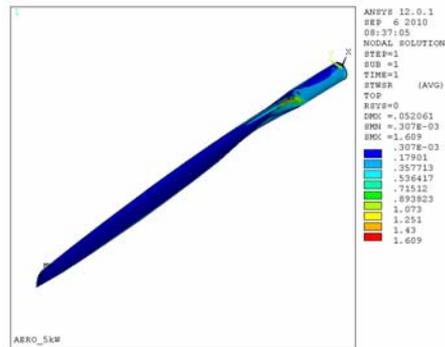


FIGURA 21. Criterio inverso de TSAI-WU para carga combinada

Este valor es el mismo que para el empuje ya que no coincide la suma de tensiones sobre el mismo lugar, además de que la aportación del par motor es menor. Por lo tanto el criterio de aceptación según la disminución de material en esta zona es igual que para solo carga de empuje.

La FIGURA 22 muestra los desplazamientos, con un valor máximo de 52 mm

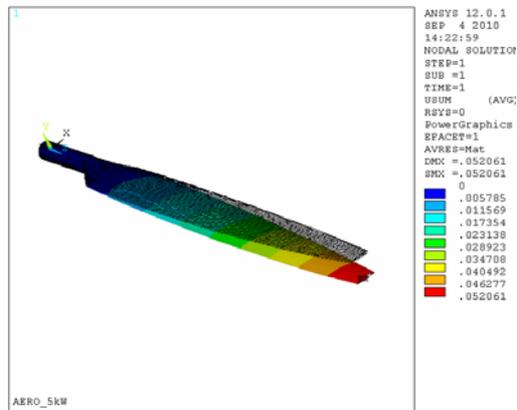


FIGURA 22. Desplazamientos ante carga combinada.

Los valores obtenidos son aceptables y por lo tanto el diseño mecánico ante estas cargas es válido.

#### 4.1.4. Análisis modal estático y en revolución

Se realiza un análisis modal con la pala en estático y uno más con la pala en su velocidad máxima de rotación, que es 200 rpm.

La TABLA 8 muestra los resultados de frecuencias para éstas dos condiciones.

TABLA 8. Resultado de frecuencias de análisis modal.

Modo	Frecuencia Estático [Hz]	Frecuencia girando [Hz]
1	9,8505	12,735
2	1,642	15,526
3	41,011	43,630
4	62,575	64,934
5	83,147	86,842
6	104,10	108,44

El primer modo equivale a una velocidad de giro de 591 rpm que es muy superior a la de giro (200 rpm) y por lo tanto es válido el diseño ante la excitación por el propio giro.

Las deformadas ante los tres primeros modos se muestran en las FIGURAS 23, 24 y 25.

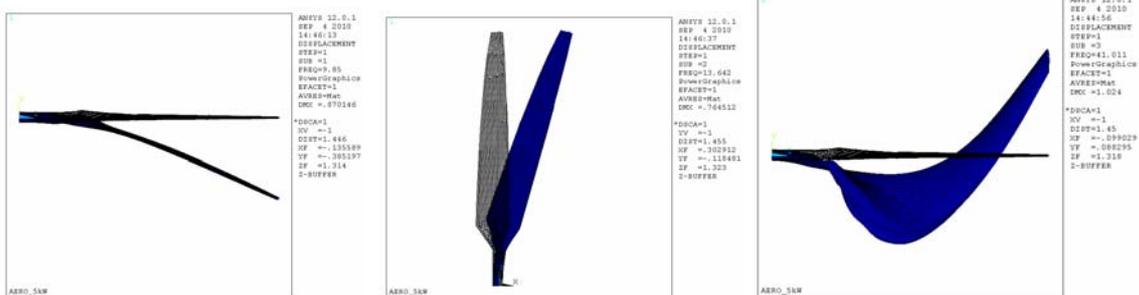


FIGURA 23, 24 y 25. Deformada ante tres primeros modos.

#### 4.1.4. Análisis de pandeo lineal

Se realiza un análisis ante pandeo que puedan producir las cargas que actúan sobre la pala. El resultado de los modos de pandeo utilizando las cargas combinadas como base se muestra en la TABLA 9.

TABLA 9. Factor de pandeo

Modo de pandeo	Factor
1	10,077
2	10,814
3	11,177

La FIGURA 26 muestra la imagen del primer modo de pandeo.

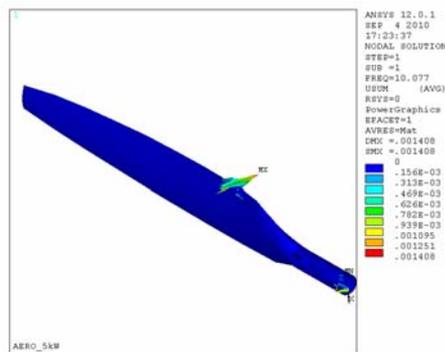


FIGURA 26. Primer modo de pandeo.

Se comprueba por lo tanto el pandeo, el cual se produce ante una carga 10 veces mayor que las cargas de diseño.

## 5. METODO DE FABRICACIÓN

De entre los posibles métodos de fabricación de una pala en fibra de vidrio, como lo son el moldeo por compresión, prepreg, filament winding y RTM: éste último ha sido seleccionado como un método adecuado y económico para la fabricación de esta pala en caso de hacerse para grandes series.

La mayoría de la industria de palas de turbinas eólicas en la actualidad utiliza técnicas manuales de apilado de laminas para procesar. Si bien hay beneficios para este proceso, los inconvenientes inherentes a este proceso junto con otras

ventajas sugieren que esta alternativa de fabricación puede ser más conveniente.

El RTM (Resin Transfer Molding) juega un papel importante en el espesor del laminado, el volumen de fibra, y el peso de las geometrías. Reduce el grosor y el peso y aumentar los volúmenes de fibra para todas las subestructuras, resultando más estricto en el seguimiento de radios de la geometría, en transiciones y eliminando la necesidad para la mayoría de las operaciones de enlaces secundarios.

Estos resultados reducen notablemente el peso de las palas y agiliza el tiempo de fabricación de las piezas.

En este proceso, por el cual el poliéster es inyectado en un molde cerrado, se pueden enumerar por lo tanto las siguientes ventajas:

- Dos caras aprovechables (lisas)
- Espesores constantes
- Mayor capacidad de producción, apto para series de hasta 10.000 piezas/ año
- Eliminación de todo tipo de imperfecciones en la superficie de la pieza
- Mejores propiedades mecánicas de la pieza acabada
- Capacidad de incluir todo tipo de insertos con facilidad
- Espesor deseado con una única tela de fibra
- Piezas tipo sándwich, con poliuretano u otros componentes en el interior

## **6. CONCLUSIONES**

Se ha desarrollado el proceso completo de diseño de la pala de un aerogenerador. Durante este proceso se ha comprobado la utilidad de diferentes herramientas de cálculo computacional como lo son el WT-PERF

para el diseño aerodinámico, el NuMAD para la generación de geometría y el ANSYS para el cálculo estructural.

Se ha comprobado como el NuMAD es un programa que agiliza el proceso de creación de un modelo para calculo en elementos finitos, permitiendo realizar fácilmente cambios en la definición y configuración de materiales compuestos y de perfiles aerodinámicos. El uso de ésta herramienta permite llegar de manera mas adecuada y correcta a un modelo en elementos finitos lo que conlleva consigo una mejora en la definición estructural, ya que al ser un proceso que conlleva un tiempo más corto se puede incidir la optimización del diseño.

El calculo en ANSYS de la pala diseñada comprueba la resistencia del diseño estructural y por lo tanto permite continuar con la selección de un método de fabricación. Se determina que el RTM es un proceso que es adecuado para palas pequeñas con geometrías complejas y grandes series.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. RODRIGUEZ, J.L. Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica. Editorial Rueda S.L. Madrid: 2003.
2. ABBOTT IRA, VON DOENHOFF ALBERT. Theory of Wing Sections. Dover Publications. New York: 1959.
3. J. L. TANGLER. NREL Airfoil Families for HAWTs. National Renewable Energy Laboratory. 1617 Cole Boulevard Golden, Colorado 80401-3393.
4. MARTIN HANSEN. Aerodynamics of Wind Turbines. James and James. London : 2003
5. SOMERS, D.M. The S822 and S823 Airfoils. National Renewable Energy Laboratory. 1992-1993
6. BERTAGNOLIO F; SORENSEN N; JOHANSEN J and FUGLSANG. Wind Turbine Airfoil Catalogue. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark. August 2001.
7. BAK, C; FUGLSANG, P; MADSEN, A. Airfil Characteristics for Wind Turbines. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark. March 1999.
8. BUHL, M. WT\_PERF User's Guide. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado. December 17, 2004
9. LAIRD, D; RESOR, B; NuMAD User's Manual. Wind Energy Technology- Sandia National Laboratories. Albuquerque. September 2009.
10. CAIMS, D; SKRAMSTAD, J. Resin Transfer Molding and Wind Turbine Blade Construction. Sandia National Laboratories. Albuquerque. January 2000.