

CÁLCULO ESTRUCTURAL DE PALA DE GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA PARA ZONAS DE VIENTOS LEVES

A. Liberatto^a y G. Jeandrevin^a

^a Departamento Mecánica Aeronáutica - Facultad de Ingeniería - Instituto Universitario Aeronáutico
Av. Fuerza Aérea 6500 – (5010) Córdoba - Argentina

RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis estructural de la pala de un aerogenerador construida en material compuesto. Los elementos estructurales se diseñan en respuesta a los requerimientos de la regulación internacional IEC 61400-2. El estudio se realiza sobre un modelo de elementos finitos construido a partir de la geometría de la pala. Aplicadas las cargas previstas por la norma y asignadas las condiciones de apoyo, se estima la distribución de tensiones actuantes realizando un análisis estático lineal. Los resultados generados, junto a las propiedades mecánicas de los materiales utilizados, se emplean en el cálculo de índices de falla, permitiendo decidir sobre la integridad estructural de la configuración propuesta y el cumplimiento con el estándar.

Palabras clave: cálculo estructural, pala aerogenerador, elementos finitos.

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto “Factibilidad Técnica, Económica y Ambiental de la Producción de Hidrógeno en la Provincia de Córdoba en Base a Recursos Eólicos Evaluada a Partir de Mediciones de Campo”, seleccionado en la convocatoria 2004 PICTOR II realizada por la ex Agencia Córdoba Ciencia y actualmente en ejecución en el Instituto Universitario Aeronáutico se desarrollan las palas de un generador eólico prototipo de eje horizontal, de 2 kW de potencia, preparado para operar en zonas de vientos leves.

El rotor del aerogenerador consta de tres palas cuya función es transmitir potencia al eje del generador eléctrico, en cumplimiento con los requerimientos de diseño. Cada pala se encuentra sujeta a una combinación de cargas aerodinámicas y máscas que introducen solicitaciones de tracción, torsión, corte y flexión. A fin de realizar un diseño estructural adecuado y satisfacer los requerimientos de seguridad de la normativa de aplicación, se analiza la distribución de tensiones actuantes. Para ello se construye un modelo de elementos finitos, con elementos tipo lámina, sobre el que se aplican las fuerzas y momentos correspondientes a los diferentes casos de carga especificados en la norma IEC 61400-2 [1]. Esta regulación prevé seis casos de carga a considerar en el análisis estructural de la pala. Dos de ellos, los designados como E y F, producen las mayores solicitaciones y se utilizan para el dimensionamiento de la estructura. Ambos casos corresponden a la condición **rotor estático (parked)**, que hace referencia a la situación potencial en la que el rotor del aerogenerador se encuentre detenido y expuesto a ráfagas.

DESCRIPCIÓN GENERAL

Las palas del aerogenerador poseen un diseño aerodinámico orientado a optimizar la transferencia de la energía del viento a la máquina eléctrica. En cada pala se pueden identificar tres zonas diferentes: una zona operativa, diseñada con perfil aerodinámico S822 [6], de cuerda y ley de alabeo variable; una zona de toma, que provee a la pala de un elemento de apoyo con el cubo del rotor; y una zona de transición entre la zona operativa y la de toma.

La longitud de cada pala es 3000 mm, la cuerda de puntera mide 200 mm y la cuerda máxima 503 mm. La zona operativa se extiende desde la puntera 2470 mm hacia la raíz, la zona de transición mide 320 mm y la zona de toma 160 mm. Esta última posee una sección circular de 90 mm de diámetro y termina en un cono de 125 mm de diámetro y 30 mm de alto. Ver **Figura 1**.

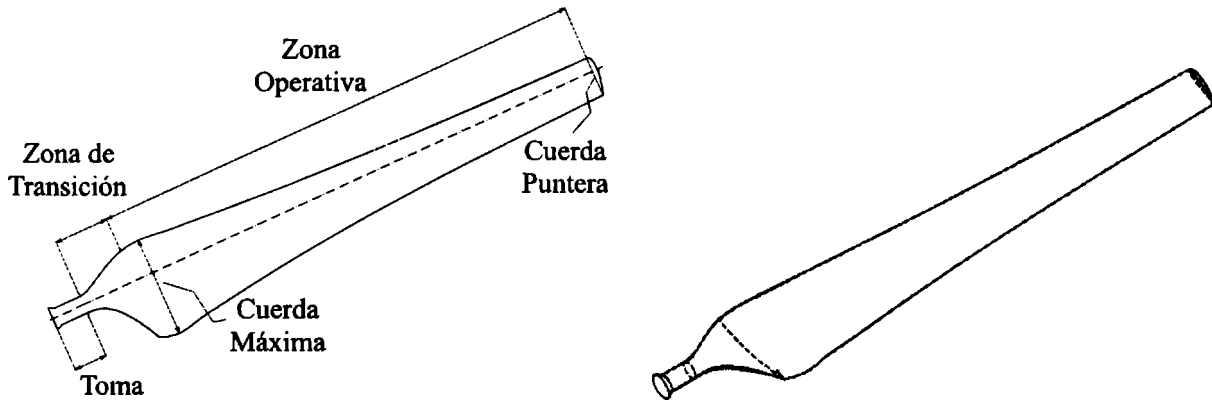


Figura 1. Geometría de la pala.

ESTANDAR DE APLICACIÓN Y CÁLCULO DE CARGAS

Las características del generador eólico estudiado lo encuadran en el marco de la regulación IEC 61400-2 "Safety of Small Wind Turbines". El objetivo de este estándar internacional es proveer al sistema de un adecuado nivel de protección contra posibles daños que pudieran ocurrir a lo largo de su vida útil. Adicionalmente, tiende a asegurar la calidad y la integridad estructural de los componentes y especifica requerimientos de seguridad para pequeños aerogeneradores incluyendo el proceso de diseño, la instalación, mantenimiento y operación de los mismos en condiciones específicas [1].

Dentro de las especificaciones de diseño, establece un número mínimo de casos de carga a considerar al momento de dimensionar las palas. Dichos casos se presentan en forma sintética en la Tabla 1.

Tabla 1. Casos de carga de diseño. Método simplificado de cálculo de cargas. Tabla extraída de [1].

Design situation		Load case	Wind inflow	Type of analysis	Remark
Power production	A	Cyclic wind loading during normal operation	Cyclic varying wind speed around V_R	Fatigue	Power alternates cyclically between $1.5P_R$ and $9.5 P_R$ Rotor speed alternates cyclically between $1.5 n_R$ and n_R
	B	Yawing	$V_{hub} = V_R$	Ultimate loads	Maximum possible yaw speed
	C	Loss of electrical connection	$V_{hub} = V_{exr}$	Ultimate loads	Measure the rotor speed at normal wind speed and extrapolate to V_{ext}
Shut-down	D	Normal shut-down	$V_{hub} = V_R$	Ultimate loads	Braking torque
Parked	E	Minimum exposure	$V_{hub} = 1.4 V_{exr}$	Ultimate loads	Normal parking position
	F	Maximum exposure	$V_{hub} = V_{exr}$	Ultimate loads	Maximum attack area

El caso A prevé la potencial falla de los materiales por fatiga y se calcula para variaciones cíclicas de viento alrededor de la velocidad V_R (*rated wind speed*) definida como la velocidad de viento a la que el aerogenerador entrega la potencia nominal. Para el aerogenerador estudiado, $V_R = 7$ m/s. El caso B indica calcular las fuerzas y momentos actuantes para la situación hipotética en la que, con velocidad de viento V_R , el rotor gire simultáneamente a la velocidad de yaw máxima posible.

El caso C prevé la eventual desconexión eléctrica de la carga exigiendo que el aumento de velocidad angular consecuente no ponga en riesgo la integridad estructural de las palas. Este análisis debe ser realizado a velocidad de viento V_{exr} (*reference extreme wind velocity*), que para este caso particular es $V_{exr} = 35$ m/s.

El caso D corresponde a la detención normal del rotor por acción del sistema de frenado; y los casos E y F a la situación: rotor detenido y expuesto a ráfagas, con mínima y máxima área expuesta, respectivamente.

Para cuales quiera de las situaciones planteadas, se debe garantizar la integridad de la estructura y, para ello, una de los procedimientos a seguir consiste en dimensionar la pala a partir de la condición de carga más exigente y hacer una verificación posterior para el resto de los casos. En este trabajo, las palas se dimensionan a partir de los casos de carga E y F, el resto de los casos se verifican. Los diagramas de fuerzas y momentos respectivos se presentan en la Figura 2.

Por otra parte, el estándar IEC [1] especifica un factor de seguridad 3 para los casos de carga correspondientes a carga última, es decir, que la pala debe ser construida para romper al 300% del valor de la carga límite.

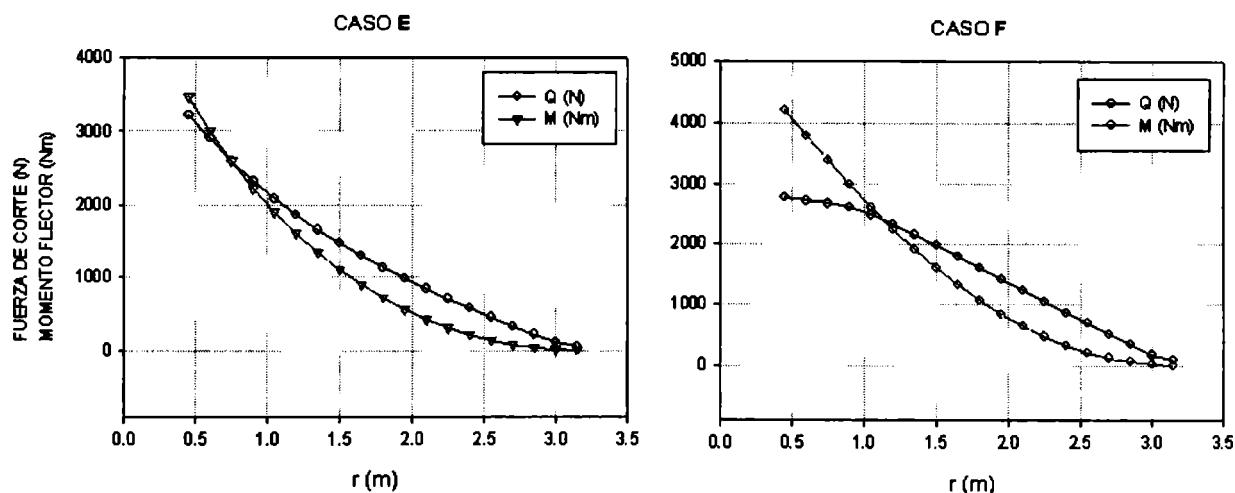


Figura 2. Distribución de fuerzas de corte y momentos flectores a lo largo de la pala.

MATERIALES

La estructura resistente de las palas se construye en plástico reforzado con fibras (PRF) combinando entramados de vidrio T220 (tejido bidireccional de 220 gr/m²) y UR 460 (tejido unidireccional de 460 gr/m²), en una matriz de resina viniléster.

Para decidir sobre la falla de los elementos estructurales bajo tensión, se utilizan los denominados índices de falla cuyo cálculo exige conocer las características mecánicas de los materiales utilizados que, para la composición descrita y en general para todos los materiales compuestos, no solo dependen de los materiales presentes en la mezcla, sino también del proceso seguido durante su elaboración. Esta característica convierte en poco confiables a las fuentes de datos de propiedades mecánicas para materiales compuestos ya que no se tiene certeza sobre cuales materiales fueron empleados no tampoco cuales fueron los modos de fabricación seguidos. Con base en esto, se adoptan los datos presentados en Modern Aircraft Design [3] y, en busca de alguna forma de respaldo para estos valores, se realiza una serie de ensayos mecánicos a probetas construidas con la misma tecnología de fabricación empleada en las palas. Los ensayos mecánicos se realizan de acuerdo con las especificaciones del estándar DNV-OS-C501 (*Composite components*) [2], que provee requerimientos y recomendaciones para diseño de estructuras de material compuesto y establece los procedimientos de análisis.

DESCRIPCION DE LA CONFIGURACION ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista constructivo cada pala queda conformada por la unión de cuatro elementos: la cáscara del intrados, la cáscara del extrados (ambas plásticas), un labio de pegado en el borde de ataque y el larguero de madera.

Atendiendo a la necesidad de definir una estructura eficiente, y previendo el incremento de las solicitaciones hacia la zona de transición y toma, la estructura resistente de la pala, se divide en seis zonas según se indica en la **Figura 3**. Cada sector se diferencia de los demás en la cantidad de capas y en el tipo de tela de vidrio utilizada. En todos los casos el laminado se construye haciendo una combinación de telas T220 orientadas a $0-90^\circ$, T220 a $\pm 45^\circ$ y UR460 a 0° . La cantidad varía desde 4 capas de tela en la zona 1 hasta 19 capas en la zona 6.

Puede enumerarse una serie de consideraciones en las que se basa la configuración estructural propuesta:

- Mantener la integridad estructural cumpliendo con los factores de seguridad especificados por la regulación IEC 61400-2 [1].

- Lograr una distribución de tensiones suave, cualquiera sea la condición de carga considerada.

- Obtener un diseño estructural eficiente.

- Reforzar aquellas zonas con mayores solicitaciones.

- Proveer áreas de pegado adecuadas sobre las líneas de bode de ataque y de fuga.

- Orientar las telas en forma apropiada para transmitir eficientemente las solicitaciones.

- Obtener una estructura suficientemente rígida para ser manipulada sin deformaciones excesivas.

- Construir laminados simétricos.

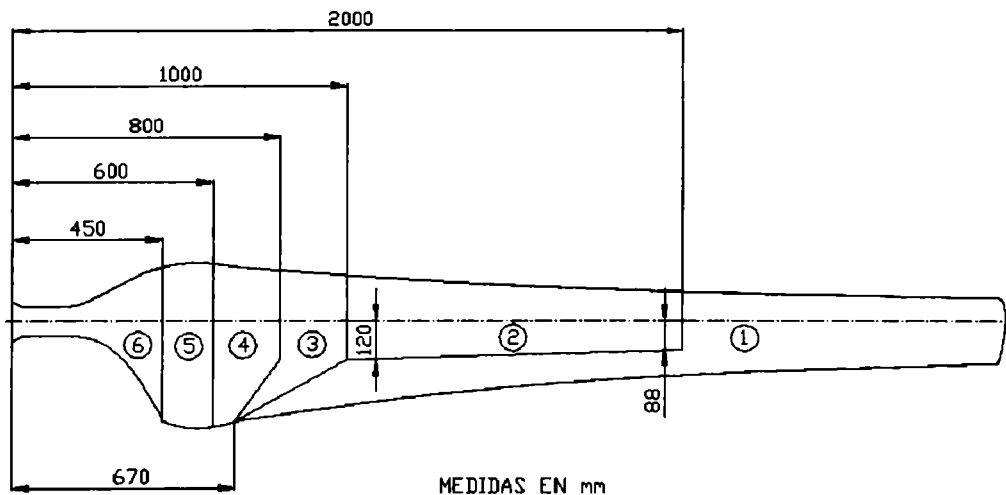


Figura 3. Definición de las zonas con diferente disposición de las fibras.

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Finalizado el diseño de la pala, la geometría se exporta al software de cálculo y se divide a las superficies incorporando nuevas secciones transversales y algunas divisiones longitudinales con el propósito de construir un modelo geométrico práctico para la asignación de los materiales.

Como se mencionó arriba, la estructura de la pala se encuentra formada por las cáscaras del extrados e intrados, el labio de pegado y el larguero de madera. Con el fin de realizar un estudio conservativo de la distribución de tensiones, sobre el modelo de cálculo, no se considera el trabajo realizado por el larguero ni el labio de pegado, solo se tiene en cuenta el de las dos cáscaras de compuesto.

Adicionalmente se incorporan costillas rígidas en las estaciones sobre las que se aplican las cargas concentradas, a los fines de distribuirlas y evitar la aparición de zonas con tensiones elevadas, no representativas del problema analizado.

El modelo de elementos finitos se construye con elementos tipo "lámina" que, en el software de cálculo utilizado, tienen la capacidad de transmitir tensiones membranales, corte y flexión. Esta clase

de elemento es del tipo placa formado por una o más láminas de materiales con propiedades y espesores diferentes y orientaciones distintas.

La malla generada sobre el modelo geométrico se muestra en la **Figura 4**.

Las palas del generador eólico se montan al cubo del rotor mediante una toma cilíndrica que ofrece a cada una de ellas una condición de apoyo: **empotrado**. Este efecto se introduce en el modelo de elementos finitos restringiendo los grados de libertad en traslación de los nodos ubicados en la zona cilíndrica de la toma.

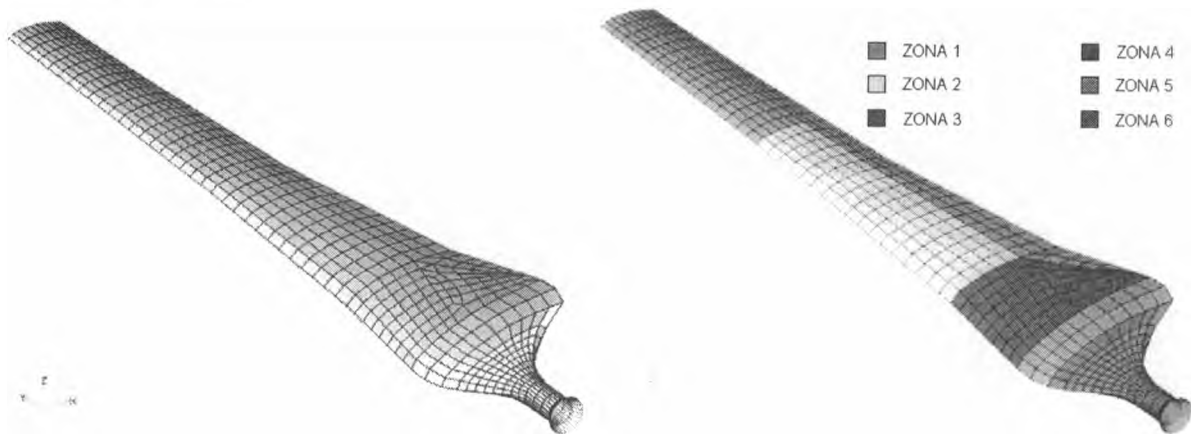


Figura 4. Modelo de elementos finitos.

ANÁLISIS DE TENSIONES

El análisis de la estructura se realiza sobre una serie de hipótesis, dentro de las cuales se asume que las cáscaras plásticas no sufren inestabilidades, haciendo que cada estación a lo largo de la pala resulte 100 % efectiva en flexión. Otra consideración, ya mencionada, es que el larguero de madera no colabora con el resto de la estructura para resistir las cargas, contribuyendo a un análisis más conservativo dirigido a cubrir las incertidumbres presentes en el proceso constructivo y la dispersión en los resultados de ensayo de los materiales.

El cálculo se realiza para cargas estáticas, utilizando ecuaciones cinemáticas de pequeños desplazamientos y suponiendo que el comportamiento del material es elástico lineal.

Se genera la distribución de tensiones actuantes y por simple inspección de cada lámina se extraen los estados de tensiones de las zonas más comprometidas. Cada tensor se escribe en términos de las direcciones principales del material y se calculan los índices de falla correspondientes para decidir sobre la rotura o no de la lámina estudiada.

ÍNDICES DE FALLA

Los laminados en material compuesto presentan propiedades mecánicas diferentes en sus tres direcciones principales, y por lo tanto, la resistencia mecánica del laminado es función de la orientación de la lámina con respecto a la tensión aplicada. Para la evaluación de la integridad estructural de una lámina de material compuesto existen diversas teorías que definen un parámetro llamado *índice de falla* que permite decidir sobre la rotura de la lámina analizada. Una lámina habrá fallado cuando el índice de falla alcance el valor 1.0.

Para materiales ortotrópicos sometidos a un estado plano de tensiones (general), con resistencias diferentes en tracción y compresión, Tsai-Wu [4] propone la siguiente ecuación:

Donde:

- X_t : Tensión admisible de tracción en la dirección principal α de la lámina.
 X_c : Tensión admisible de compresión en la dirección principal α de la lámina.
 Y_t : Tensión admisible de tracción en la dirección principal β de la lámina.
 Y_c : Tensión admisible de compresión en la dirección principal β de la lámina.
 S : Tensión admisible de corte en la dirección $\alpha\beta$ de la lámina.
 F_{12} : Coeficiente que debe ser determinado experimentalmente a partir del ensayo de probetas sometidas a un estado biaxial de tensiones. Estudios realizados [5] sugieren adoptar $F_{12} = 0$.

RESULTADOS

El análisis de tensiones realizado sobre el modelo de elementos finitos proporciona la distribución de tensiones actuantes en toda la extensión de la pala y para cada una de las láminas componentes. Con el objeto de determinar el porcentaje de la carga límite para el que se produce la falla de alguna de estas láminas, se seleccionan aquellos puntos en los que el estado de tensiones dado por f_x (tensión normal en la dirección "x"), f_y (tensión normal en la dirección "y") y f_s (tensión de corte), corresponde a: $[f_{x\max}, f_y, f_s]$, $[f_x, f_{y\max}, f_s]$ y $[f_x, f_y, f_{s\max}]$, es decir, se revisan tres estados de tensiones por lámina para cada uno de los casos de carga. Como se mencionó arriba, dichos estados de tensiones se rescriben en términos de las direcciones principales del material y se calculan los índices de falla obteniendo los resultados presentados en las Tablas 2 y 3, en las que se incluye para cada caso de carga y para cada una de las láminas, el estado de tensiones considerado más crítico, su ubicación en la pala y el índice de falla correspondiente.

Tabla 2. Estados de tensiones críticos sobre la cáscara traccionada. Casos E y F.

Lámina	CASO: E - j = 1.12					CASO: F - j = 2.66				
	Zona	f_x	f_y	f_s	I. F.	Zona	f_x	f_y	f_s	I. F.
1	6	136.21	-14.89	-3.31	0.47	6	58.02	-6.89	-4.05	0.54
2	6	97.25	34.07	-8.78	0.40	6	11.02	45.61	-1.41	0.74
3	6	261.96	-2.02	-3.71	0.22	6	99.42	-1.37	-5.15	0.24
4	6	259.73	-0.78	-4.46	0.23	6	65.16	2.74	-9.46	0.38
5	6	41.48	83.11	-8.71	0.12	6	20.46	33.12	-18.53	0.62
6	6	132.91	-4.83	-7.13	0.40	6	33.57	3.37	-12.30	0.45
7	6	254.53	2.13	-6.21	0.24	6	107.07	0.99	-3.08	0.25
8	6	252.30	3.37	-6.96	0.25	6	61.62	2.41	-9.83	0.39
9	6	130.71	1.87	-9.69	0.36	6	22.39	6.27	-12.72	0.40
10	6	248.59	5.45	-8.21	0.26	6	39.91	2.34	-10.17	0.38
11	6	129.34	6.06	-11.28	0.34	6	34.64	-0.03	-13.35	0.57
12	5	0.93	54.67	-15.19	0.30	6	65.82	0.97	-10.80	0.46
13	6	242.65	8.77	-10.21	0.30	6	65.02	1.06	-11.21	0.49
14	6	127.14	12.76	-13.83	0.33	6	33.59	0.46	-14.74	0.67
15	6	86.69	33.00	-24.39	0.31	6	8.99	44.49	-10.59	0.84
16	6	237.46	11.68	-11.96	0.33	6	63.15	1.25	-12.16	0.57
17	6	185.52	34.84	5.23	0.43	6	62.35	1.33	-12.58	0.61
18	6	8.66	98.20	-34.13	1.00	6	11.20	50.07	-8.62	1.00
19	6	107.48	-1.31	-29.27	0.62	6	32.00	1.20	-16.85	0.83

Tabla 3. Estados de tensiones críticos sobre la cáscara comprimida. Casos E y F.

Lámina	Zona	CASO: E - j = 1.22				Zona	CASO: F - j = 2.64			
		f_x	f_y	f_s	I. F.		f_x	f_y	f_s	I. F.
1	1	-155.03	12.03	1.54	0.57	6	-57.38	-3.53	-0.11	0.38
2	6	-83.52	-24.04	6.84	0.38	6	-38.73	-8.23	6.29	0.42
3	6	-226.29	-2.33	0.24	1.01	6	-107.46	-3.41	-0.17	1.01
4	6	-224.46	-3.17	0.00	0.99	6	-106.26	-3.49	-0.22	0.99
5	3	-153.55	-9.11	-1.89	0.48	6	-1.49	-33.76	4.80	0.39
6	3	-149.30	-9.38	-1.73	0.46	6	-54.99	-4.24	-0.38	0.36
7	6	-220.17	-5.14	-0.50	0.94	6	-103.48	-3.66	-0.34	0.94
8	6	-218.33	-5.99	-0.72	0.91	6	-102.29	-3.73	-0.39	0.92
9	6	-113.91	-7.28	-1.15	0.33	6	-53.40	-4.72	-0.56	0.34
10	6	-215.27	-7.40	-1.09	0.88	6	-100.30	-3.86	-0.48	0.89
11	6	-112.70	-10.13	-1.62	0.33	6	-52.40	-5.02	-0.66	0.33
12	6	-212.21	-8.80	-1.46	0.85	6	-98.32	-3.98	-0.56	0.85
13	6	-210.37	-9.65	-1.68	0.83	6	-97.12	-4.06	-0.62	0.83
14	6	-110.75	-14.70	-2.38	0.32	6	-50.81	-5.49	-0.84	0.32
15	6	-76.78	-41.74	27.15	0.30	6	-36.31	-6.31	8.14	0.40
16	6	-206.10	-11.62	-2.19	0.79	6	-94.34	-4.23	-0.73	0.79
17	6	-204.25	-12.46	-2.42	0.77	6	-93.15	-4.31	-0.79	0.77
18	6	-80.65	-39.60	25.73	0.33	6	-37.69	-5.96	7.22	0.43
19	6	-107.82	-21.61	-3.52	0.31	6	-48.40	-6.21	-1.11	0.29

En la **Figura 5** se presenta una visualización de la distribución de tensiones normales f_x , actuantes en la dirección longitudinal de la pala, sobre la lámina 1.

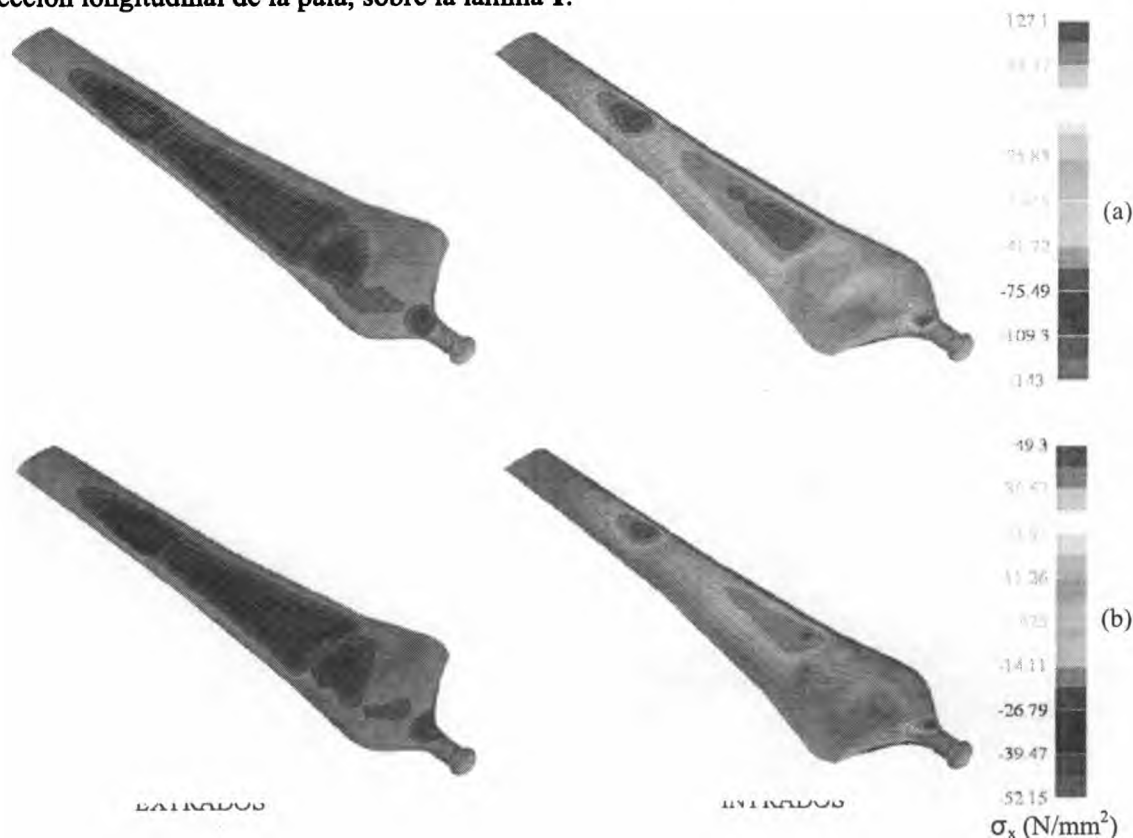


Figura 5. Distribución de tensiones normales actuantes sobre la lámina 1.
(a) Caso de carga E. (b) Caso de carga F.

Por inspección de las **Tablas 2 y 3** se encuentra que para el caso de carga **E**, el material de la cáscara traccionada falla justo sobre la toma (zona 6), en la lámina 18; cuando la carga aplicada corresponde al 112% de la carga límite. Suponiendo que no se produce la inestabilidad de la cáscara del extrados, la falla de esta se produce cuando la carga alcanza el 122% de la carga límite, también en la zona 6, pero en la lámina 3.

Para la condición de carga **F**, la cáscara del intrados falla por tracción al 266% de la carga límite (zona 6, lámina 18), mientras que la cáscara comprimida (extrados) falla al 264% de la carga límite (zona 6, lámina 3). La **Tabla 4** resume estos resultados para los dos casos de carga analizados. Indica cual es la lámina fallada, la zona a la que corresponde y el porcentaje de la carga límite para el que se produce la falla.

Tabla 4. Laminas que presentan fallas para los casos de carga de diseño E y F.

CASO	Cáscara	Zona	Lámina	% Carga Límite
E	Intrados	6	18	112
	Extrados	6	3	266
F	Intrados	6	18	122
	Extrados	6	3	164

Finalmente, para las condiciones de carga analizadas se encuentra que, si bien la primera falla se produce a un valor de carga superior al de carga límite, la estructura de la pala no cumple con el factor de seguridad indicado por la ICE [1] ($j = 3$). Este resultado pone de manifiesto la necesidad de modificar la distribución local de las telas en la zona de la toma.

Adicionalmente, no se debe perder de vista que en el análisis no se ha considerado la contribución del larguero de madera que podría resultar significativa.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo al análisis de tensiones realizado sobre la estructura resistente de la pala, se encuentra que, para *primera falla*, es decir, cuando alguna de las capas del laminado rompe, el factor de seguridad alcanzado es 1.12, fallando la cáscara del intrados en la zona de la toma. Si bien la rotura se produce por encima de la carga límite, este valor es menor al especificado en el estándar de aplicación y consecuentemente, la configuración estructural propuesta debe ser replanteada localmente.

Es probable que la pala completa falle a un porcentaje de la carga límite mayor al mencionado. Se debe tener en cuenta que los índices de falla presentados se calcularon a partir del análisis de la estructura de la pala sin haber incluido el aporte resistente del larguero, cuya contribución podría ser significativa.

Aún cuando no se ha cumplido con las especificaciones de la IEC, se prevé la construcción de una pala con la configuración estructural analizada para realizar un ensayo de flexión, validar el método de cálculo y los criterios adoptados; y de este modo, abordar un nuevo diseño con mayor cantidad de datos y mejores herramientas.

REFERENCIAS

1. IEC (Commission Electrotechnique Internationale): Wind Turbine Generator Systems Part 2: Safety of Small Winds Turbines; International Standar IEC 1400-2, First Edition, 1996.
2. DNV-OS-C501 (*Composite components*).
3. Martin Hollmann: "Modern Aircraft Design"; 1991, Volume 1, Edition 2.
4. Robert M. Jones: "Mechanic of Composite Materials"; 1975, McGraw-Hill, International Student Edition.
5. Narayanaswami & Adelman: Evaluation of the Tensor Polynomial and Hoffman Strength Theories for Composites Materials; Journal of Composite Materials, Vol. II, 1977, p. 366.
6. D.M. Somers and M.D. Maughmer: Theoretical Aerodynamic Analyses of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines, 2003, NREL/SR-500-33295.