

MASTER EN SISTEMAS MECANICOS

POSGRADO EN IGENIERÍA 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.**

-ANEXOS-

FABIAN RIVEROS MOYANO

Dirigido por Jesús Cuartero Salafranca
Zaragoza, septiembre de 2010

ANEXO 1. CRITERIOS DE DISEÑO DEL AEROGENERADOR

El diseño del rotor, del cual se desprenderá el diseño de cada una de las palas, se realiza cumpliendo unas especificaciones de funcionamiento y de tamaño del aerogenerador. Estas especificaciones son un criterio del diseñador y están basadas en ya sea en buscar la máxima generación energética para un emplazamiento o condiciones de viento determinados o en un benchmarking en el cual se determinarán las condiciones de trabajo de diferentes maquinas en el mercado buscando mejorar o igualar las de los mejores diseños.

En este caso el diseño se basa en cumplir unos criterios de 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.

Para las condiciones descritas, el diseño del rotor y en general el del aerogenerador difiere del diseño uno de gran potencia conectado a red, ya que las condiciones de instalación, mantenimiento y funcionamiento son diferentes.

En el caso de la instalación y mantenimiento, al ser un producto de bajo coste y el cual se espera rentabilizar ante la reducción de consumo eléctrico de red o consumo de gasoil en caso de sistemas aislados de red, se debe buscar la minimización de equipos y operarios necesarios para instalarlo y la ausencia o minimización de operaciones de mantenimiento, buscando llegar a unas inspección visual.

Aunque un aerogenerador de 5 kW es una maquina en el que el rotor tiene un diámetro entre 4 a 6 m, dependiendo de la velocidad nominal y eficiencia de

captación eólica, y que se instala a una altura de 20 m, puede ser muy habitual que el usuario final sea quien se encargue de realizar la instalación para minimizar costes.

En el caso del funcionamiento, en esta gama de potencia y para las ubicaciones en las que puede ser destinado, lo óptimo es hacer un diseño para aprovechamiento de vientos bajos, racheados y turbulentos, buscando robustez y fiabilidad antes que un rendimiento muy alto.

En base a estos criterios mencionados y buscando una potencia de 5 kW se realizará el diseño del aerogenerador. Cabe destacar que para conseguir un aerogenerador con una potencia nominal de 5 kW, es decir a la salida del generador eléctrico, la potencia mecánica en el rotor debe ser mayor para contrarrestar las pérdidas mecánicas y eléctricas, las cuales pueden llegar a ser de un 20%.

1.1 DETERMINACIÓN DEL NUMERO DE PALAS

El tipo de rotor sobre el cual se va a trabajar es un aerogenerador de eje horizontal. Dentro de éstos, el diseño tradicional es el tripala para aerogeneradores de gran tamaño, en algunos casos bipala para aerogeneradores de tamaño medio o pequeño y excepcionalmente algunos monopalas.

La diferencia principal entre éstos es la velocidad de giro que se consigue y el coeficiente de potencia hasta el cual se puede llegar.

La FIGURA 1 muestra la velocidad específica (λ) graficada contra el coeficiente de potencia para diferentes tipos de turbinas eólicas.

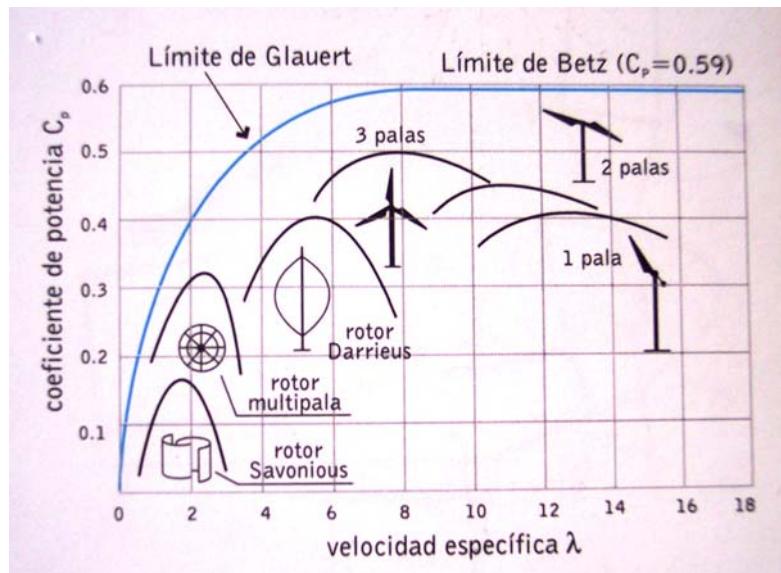


FIGURA 1. Coeficientes de potencia y lambda para diferentes rotores.

La velocidad específica es la relación entre la velocidad de punta de pala y la velocidad nominal de viento:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_n}$$

El coeficiente de potencia es la fracción que se aprovecha de la energía cinética que contiene el viento y que tal como muestra la FIGURA 1 existe un límite máximo que es conocido como el *Límite de Betz* el cual tiene un valor de 16/27, es decir que una turbina eólica puede convertir en energía mecánica como máximo un 59,26% de la energía cinética del viento que incide sobre ella.

De la FIGURA 1 también puede ver como cuanto mayor sea el número de palas, B , mayor será el coeficiente de potencia óptimo. Esto es debido a que las pérdidas por el efecto de la punta disminuyen con el número de palas. Por otra parte, al aumentar el número de palas también aumenta el coste y, además, al mantener constante el producto $B c$, donde c es la cuerda, ésta debe ser cada vez de menor tamaño lo que genera dificultades en su fabricación.

La carga global sobre la maquina en principio se mantiene independiente del numero de palas, y por lo tanto las cargas individuales sobre cada pala disminuyen proporcionalmente a B , aunque al disminuir la cuerda y el tamaño también disminuye la resistencia estructural. En principio, muchas de las maquinas modernas suelen tener tres palas, la razón se debe a que un aumento del número de palas superior a tres no conlleva un incremento significativo C_P . Por otra parte, si $B=3$ es posible compensar las variaciones de las oscilaciones del par que se producen como consecuencia de la cortadura del viento, la desalineación de la góndola y otras asimetrías de la velocidad del viento incidente.

Por último, al estar relacionada la velocidad relativa, λ , con la eficiencia óptima, de la FIGURA 1 se puede ver como las turbinas de una pala tienen una velocidad más alta que una de dos, y éstas más rápida que una de tres. Esto significa que la relación en el par es inversa y por lo tanto una turbina tripala genera para una misma potencia un par mayor. Tener un par mayor beneficia al arranque ya que vencerá más fácilmente las fuerzas de rozamiento de los elementos mecánicos.

De éste análisis, se toma la decisión de diseñar la turbina eólica con un número de 3 palas, con la base en 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.

1.2 VELOCIDAD NOMINAL

La *velocidad nominal* es la velocidad a la cual la turbina genera la potencia nominal, en este caso 5 kW. Esta velocidad determina la cantidad de energía que podrá generar la turbina en un emplazamiento particular.

En caso de seleccionar una velocidad de viento muy baja como podría ser 4 o 5 m/s, la turbina llegará muy pronto a la potencia nominal y se desaprovecharía la energía cinética contenida en los vientos más fuertes ya que nunca se sobrepasaría la potencia nominal.

Por el contrario, en el caso de seleccionar una velocidad de viento alta, como lo podría ser una velocidad superior a 20 m/s, la turbina aprovecharía un rango muy grande de velocidad, pero con una eficiencia mas baja para vientos bajos los cuales suelen ser lo mas frecuentes y por lo tanto disminuye la energía final producida a lo largo del año. A su vez, diseñar a una velocidad tan alta implica soportar cargas de viento muy altas y por lo tanto un mayor coste en los elementos mecánicos.

En definitiva, lo ideal sería para cada emplazamiento realizar un estudio de la velocidad de diseño que maximizaría la producción energética y diseñar una turbina óptima para estas condiciones, lo cual resulta inviable en cuanto a costes y estandarización del producto.

Es por esto que se busca una velocidad para la cual se pueda aprovechar de manera óptima la mayoría de las distribuciones de viento de los emplazamientos donde se pondría la turbina. En general, emplazamiento con un recurso elevado de viento suelen tener velocidades medias de 7 m/s y para emplazamientos con recursos medios está en torno de 5 a 6 m/s.

Por tanto, la velocidad seleccionada se basará en aprovechar los emplazamientos con recursos medios de viento, ya que esta es una turbina que se desarrolla para lugares urbanos y rurales en los que aunque no exista un buen recurso eólico, existe la necesidad de contar con una fuente energética.

La velocidad que se estima puede cubrir de una manera adecuada con estas condiciones es de 9,8 m/s.

1.3 VELOCIDAD DE GIRO

La velocidad de giro es un resultado directo de la determinación del numero de palas y la velocidad nominal para un λ adecuado según la FIGURA 1.

Para un tripala un λ adecuado esta en torno a 6. Partiendo de este valor, usando la velocidad nominal y el radio de pala junto con la definición de λ se determina la velocidad de rotación del rotor.

Al ser un aerogenerador de pequeña potencia no suelen usarse multiplicadores para modificar la velocidad de rotación a la entrada del generador. En cambio se utilizan generadores de velocidades de rotación menor, es decir con un número alto de polos como lo son los generadores de imanes permanentes que son los más utilizados en aerogeneradores de pequeña potencia.

En ausencia de multiplicador, la velocidad de rotación del rotor es por lo tanto la misma velocidad que la del generador lo que significa que aunque se obtenga un resultado óptimo para un λ con una velocidad nominal y un radio de pala, puede no existir un generador que gire exactamente a las revoluciones obtenidas.

Esto hace que la selección de la velocidad de giro sea un proceso iterativo en base a la disposición de velocidades de rotación de generadores comerciales y al radio de pala y λ que en su conjunto determinan el C_p 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 λ de 5,88 y a un radio de pala de 2,75 m.

ANEXO 2. DISEÑO DE PALA

2.1 PERFIL AERODINAMICO

La fuerza sobre la pala de un aerogenerador es el resultado de la acción de la velocidad relativa del aire sobre ella. Dicha velocidad relativa es la composición de la velocidad del viento y de la velocidad de giro de la propia pala. Las fuerzas que se generan son de dos tipos: fuerza de sustentación, normales a la velocidad relativa y fuerzas de arrastre, o resistencia aerodinámica paralelas a dicha velocidad relativa.

El principio de funcionamiento para el caso de un aerogenerador de eje horizontal, como lo es que es de objeto de este diseño, aparece indicado esquemáticamente en la FIGURA 2. En ella se representa un corte de la pala a una cierta distancia r del eje de giro.

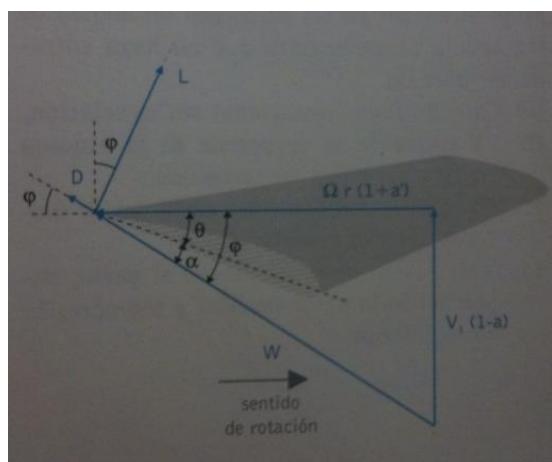


FIGURA 2. Triangulo de fuerzas sobre un perfil aerodinámico de un aerogenerador.

Si debido al giro, el perfil se mueve hacia derecha con una velocidad wr , la velocidad relativa del aire debida al giro será por lo tanto la misma hacia la izquierda. Factor $(1+a')$ que aparece multiplicando a wr se debe al giro de la

corriente inducida por el rotor, así como el factor (1-a) que multiplica a la V, que es la velocidad del viento. Con la composición de estas dos velocidades se obtiene W, con su magnitud y dirección, los cuales son:

$$W = \sqrt{(\omega r(1+a))^2 + ((1-a)V)^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{(1-a)V}{\omega r(1+a)}$$

La combinación de la fuerza de sustentación L y la de arrastre D dan como resultado la fuerza motriz que tira de la pala en la misma dirección que el giro y que por lo tanto contribuye para generar energía. Esta fuerza es:

$$F_T = L \sin \varphi - D \cos \varphi$$

De esta expresión se deduce el interés de tener perfiles que den máximo L con mínimo D, es decir una alta relación L/D.

2.2 DISEÑO DE GEOMETRÍA DE PALA

El proceso del diseño de la geometría de una pala es iterativo, modificando el ángulo de calado y la cuerda hasta conseguir una geometría que cumpla con los requisitos de diseño expuestos en el capítulo 3.

La primera iteración con la cual se obtiene una idea de la geometría se realiza utilizando el método BEM (blade element momentum) en el cual se divide la pala en n elementos y para cada uno se busca su aporte en base a las condiciones a las que esta expuesto.

Para realizar la iteración se ha utilizado el EES (Engineering Equation Solver), en el cual se programa el BEM.

A continuación se realiza una breve explicación del método y del programa realizado.

2.2.1 Método del momento del elemento de pala

A continuación se describirá muy brevemente en que consiste el modelo utilizado. Este método llamado BEM fue desarrollado por Glauert y es una ampliación de la teoría de momento 1-D en la cual la geometría del rotor no es considerada, como lo es el numero de palas, calado, distribución de cuerda y los perfiles. El BEM asocia la teoría de momento con los eventos locales que tienen lugar en las palas. El tubo de corrientes que se introduce en la teoría de momentos 1-D se discretiza en N elementos anulares de tamaño dr. La frontera lateral de cada uno de estos elementos esta formada por líneas de corriente por lo que no hay flujo a través de los elementos.

En el modelo BEM se asume lo siguiente para los elementos anulares:

1. No hay dependencia radial, lo que le pasa a un elemento no puede afectar a los otros.
2. La fuerza de las palas actuando en el flujo es constante en cada elemento anular. Esto corresponde a un rotor con infinito numero de palas.

Debido a que los rotores no tienen un número infinito de palas se introduce una corrección llamada “Prandtl's tip loss-factor” para poder llevar a cabo los cálculos para un rotor con un numero finito de palas.

Adicionalmente se incluye la corrección de Glauert para valores altos de velocidad inducida debido a que se ha demostrado empíricamente que el modelo BEM falla para valores superiores de $\frac{1}{3}$.

Para una mayor información sobre el modelo se puede consultar la bibliografía 1 y 4 ya que debido a la extensión del modelo no se describirá en mayor profundidad.

2.2.2 Programa en EES

El programa realizado en EES consiste en síntesis en realizar la siguiente iteración:

- Paso 1. Inicializar a y a' , típicamente $a=a'=0$.
- Paso 2. Calcular el ángulo de flujo Φ
- Paso 3. Calcular el ángulo local de ataque $\alpha = \Phi - \theta$
- Paso 4. Leer C_l (alfa) y C_d (alfa) de las tablas para un número de Reynolds.
- Paso 5. Calcular C_n y C_t .
- Paso 6. Calcular a y a' usando el Prandtl tip loss factor
- Paso 7. Si a y a' han cambiado por más de cierto valor de tolerancia, ir al Paso 2. o terminar
- Paso 8. Calcular las fuerzas locales en los segmentos de la pala

La pala se divide en 9 elementos, cada uno representado por su correspondiente dr y radio y se itera en base al ángulo de calado y cuerda para encontrar maximizar la potencia entregada, es decir conseguir que a , la velocidad inducida, tenga su valor óptimo de $1/3$.

2.2.3 Primera aproximación

El resultado de la primera iteración para cada uno de los 9 elementos de pala se muestra en la TABLA 1.

TABLA 1. Resultados 1^a iteración.

Elemento de pala	Radio [m]	Velocidad Relativa W [m/s]	a	a'	calado [grad]	α [grados]	Cuerda [m]
1	0,625	16	0,332	0,115	18	6,18	0,57
2	0,875	20,52	0,330	0,061	12,4	6,26	0,46
3	1,125	25,3	0,330	0,037	8,9	6,14	0,39
4	1,375	30,23	0,330	0,025	6,4	6,14	0,33
5	1,625	35,25	0,333	0,018	4,4	6,29	0,28
6	1,875	40,32	0,332	0,013	3,2	6,14	0,25
7	2,125	45,43	0,332	0,010	2,2	6,08	0,22
8	2,375	50,57	0,331	0,008	1,3	6,16	0,18
9	2,625	55,72	0,331	0,006	0,8	5,95	0,12

En ésta se puede ver como a llega a su valor óptimo cercano a $1/3$ y como el ángulo de ataque α es cercano en todos los casos a 6° . Esto se debe a que para este perfil el C_l/C_d máximo se obtiene para ángulos cercanos a este valor.

La distribución de cuerda obtenida se muestra graficada en la FIGURA 3.

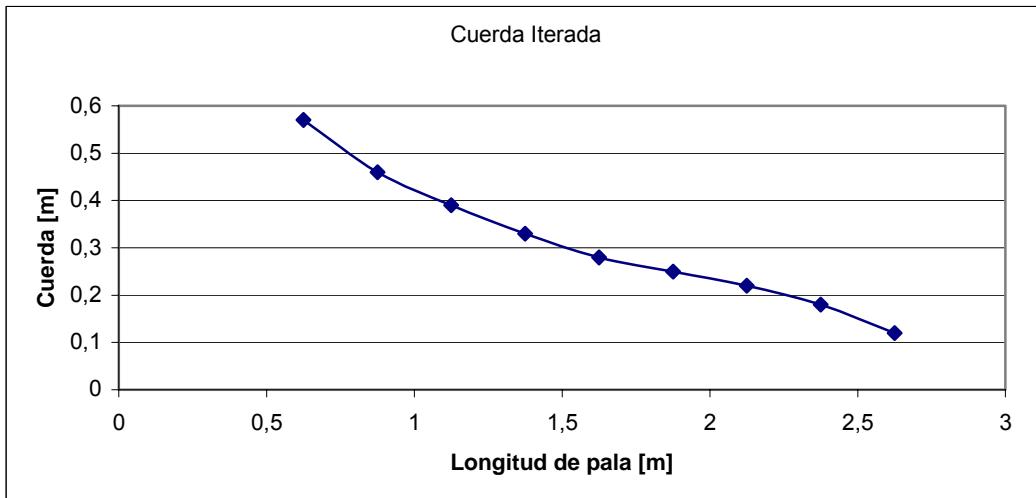


FIGURA 3. Cuerda primera iteración

Otros resultados calculados con el programa desarrollado son los siguientes:

- Potencia: 6,41 kW
- C_p : 0,46

La distribución de cuerda, aunque aerodinámicamente genera un rendimiento alto, tiene una geometría que no es adecuada para la fabricación. Esto es debido a que la cuerda en el primer elemento de pala, es decir en el radio mas bajo que corresponde a 0,375 es muy grande por lo cual generar un entronque adecuado con el buje sería difícil.

Debido a que los primeros elementos no contribuyen de manera determinante con la potencia generada por la pala, se suele hacer un corte en los primeros elementos para disminuir el tamaño de la cuerda y hacer la pala más fabricable.

2.2.4 Comprobación de primera aproximación

Para comprobar la primera aproximación, en la cual ya se tiene una geometría aproximada a la que será la geometría definitiva, se utiliza 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. Este código desciende del PROP el cual fue desarrollado por la Universidad de Oregon hace algunas décadas [8].

Este programa genera dos archivos de resultados, el primero contiene la potencia, Cp, torque, momento flector para diferentes velocidades de viento del rotor del aerogenerador.

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.

Para utilizar este código se deben determinar las curvas aerodinámicas para cada elemento de pala en las que se tengan en cuenta los efectos 3D causados por la rotación de la pala y éstas curvas deben estar disponibles en un rango completo de 360°.

2.2.3.1 Efectos 3D en coeficientes Eólicos

El efecto 3D en las palas genera un aumento de la sustentación en la base de la pala y un descenso en la punta de la pala en comparación con el comportamiento en 2D. Esto se debe a que existe un flujo radial en la base de las capas límites en palas en rotación y este altera las características del arrastre y la sustentación de la sección del perfil aerodinámico. El flujo externo induce una fuerza de Coriolis en dirección de la cuerda, que actúa como un

gradiente de presión favorable que tiende a retrasar la separación de la capa límite [7].

Para cada uno de los 9 elementos en los que se ha dividido la pala y para cada uno de los Números de Reynolds que se utilicen para interpolar se deben calcular los efectos 3D.

En la FIGURA 4 se muestra el efecto 3D en el coeficiente de sustentación y la FIGURA 5 para el coeficiente de arrastre, ambas en el caso de $Re = 0.6E6$ y el elemento 1, que es el mas cercano al buje, con un radio de 0.375m

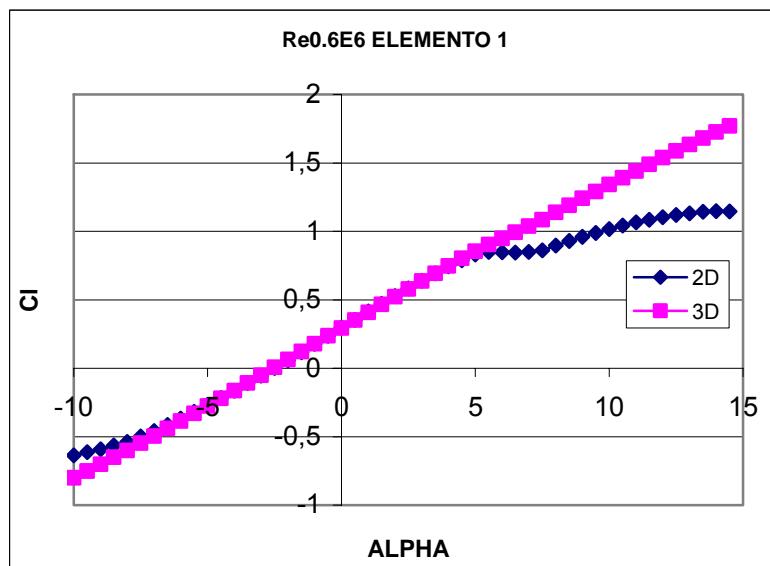


FIGURA 4. Efecto 3D en elemento 1 para Cl

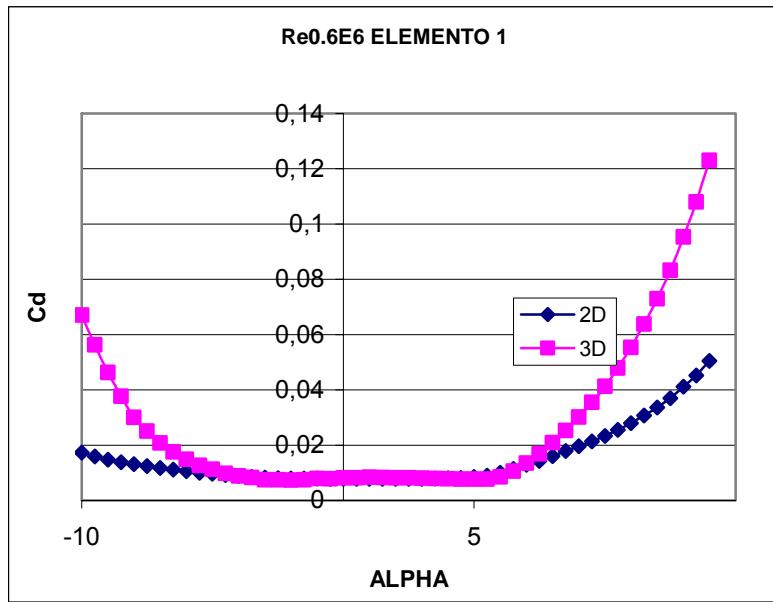


FIGURA 5. Efecto 3D en elemento 1 para C_d

De estas dos FIGURAS se puede ver como en flujo 3D se genera un aumento del coeficiente de sustentación y de arrastre en comparación con 2D.

En el caso de un elemento cercano a la punta de pala, como lo es el elemento numero 8, que se encuentra en un radio de 2,375 m, aunque se esperaba un leve descenso del coeficiente de sustentación, el efecto 3D no tiene casi repercusión alguna. Las FIGURAS 6 y 7 muestran los resultados para $Re = 0,6E6$.

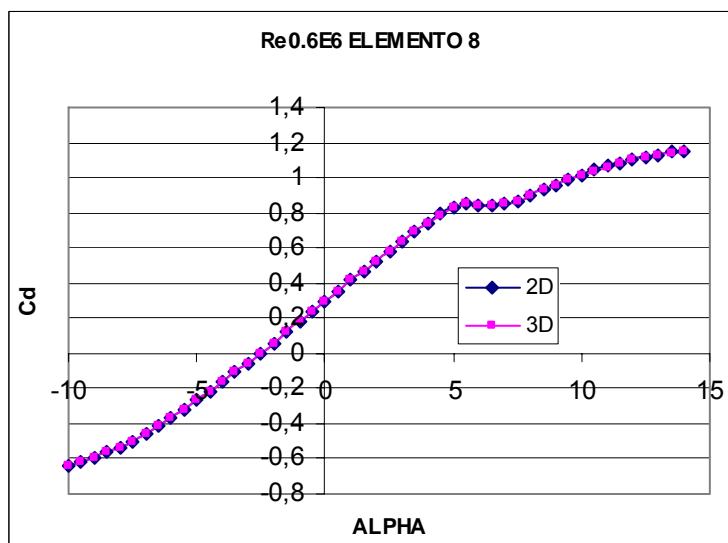


FIGURA 6. Efecto 3D en elemento 8 para C_l

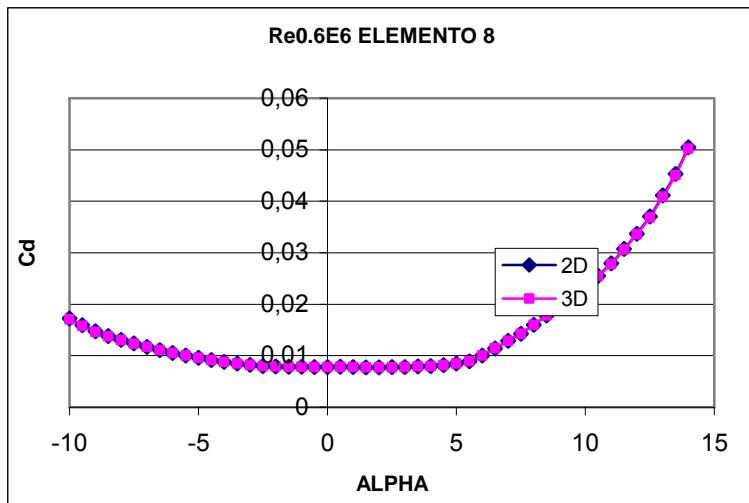


FIGURA 7. Efecto 3D en elemento 1 para Cd

Debido a que el efecto 3D aumenta la sustentación a la vez que el arrastre, lo que produce que el primero aumente la fuerza tangencial y el segundo la disminuya, lo importante es ver el efecto combinado, es decir C_l/C_d . La FIGURA 8 muestra este resultado.

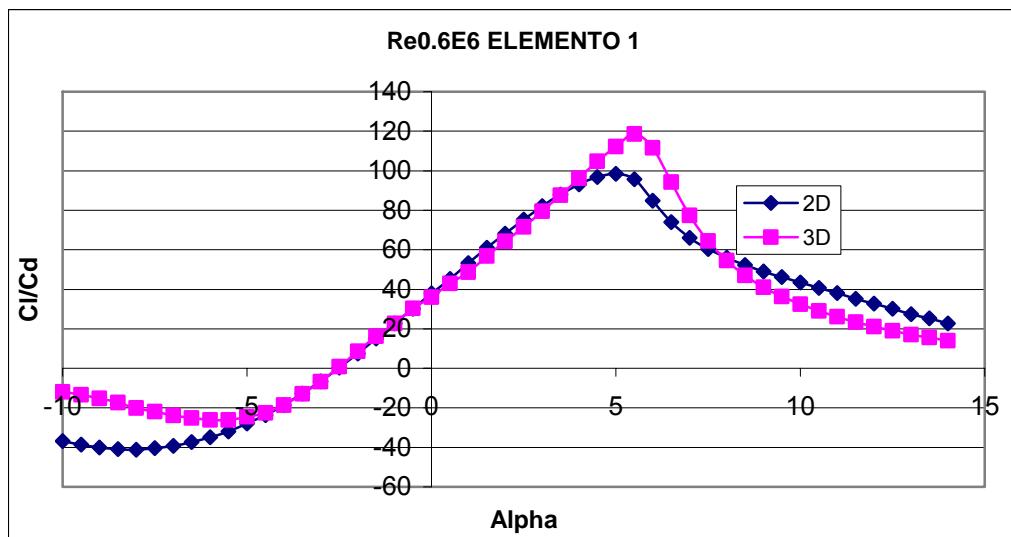


FIGURA 8. Efecto 3D Cl/Cd

De ésta FIGURA 8 se puede ver que para el ángulo de ataque óptimo, de 6° , existe un aumento de la relación C_l/C_d y un retraso en la entrada en perdida. Por otra parte para ángulos altos de ataque altos la fuerza tangencial sería menor que la esperada en 2D y por lo tanto la potencia producida, teniendo

esto un efecto en un mejor control de potencia para el caso de un aerogenerador de control por entrada en perdida.

2.2.3.2 Generación de curvas en rango de 360°

El viento real sobre una turbina eólica no se presenta en dirección normal al rotor ya que este puede ser turbulento o tener componentes sobre el eje vertical. Adicionalmente, un viento normal al rotor requiere una alineación perfecta en yaw (ángulo azimutal) con relación a la dirección del viento, lo que no tiene por que ocurrir ya que esta orientación se realiza ya sea mediante la orientación activa con motores a partir de la medición de la dirección en una veleta, o, mediante en pequeños aerogeneradores mediante un timón de orientación.

Esto produce que el viento incidente sobre una pala pueda tener ángulos de ataque con valores muy diferentes a los esperados en un evento teórico de viento perpendicular al rotor, lo que genera condiciones de cargas que deben ser analizadas en el calculo estructural de los elementos.

Debido a esto, para cada uno de los elementos a los que se les ha determinado el efecto 3D se les debe extrapolar la curva en un rango de 360° en previsión de poder determinar las cargas bajo condiciones de viento en cualquier dirección.

La FIGURA 9 muestra la extrapolación de una de las curvas, la correspondiente al elemento 9 para un $Re = 0,6E6$.

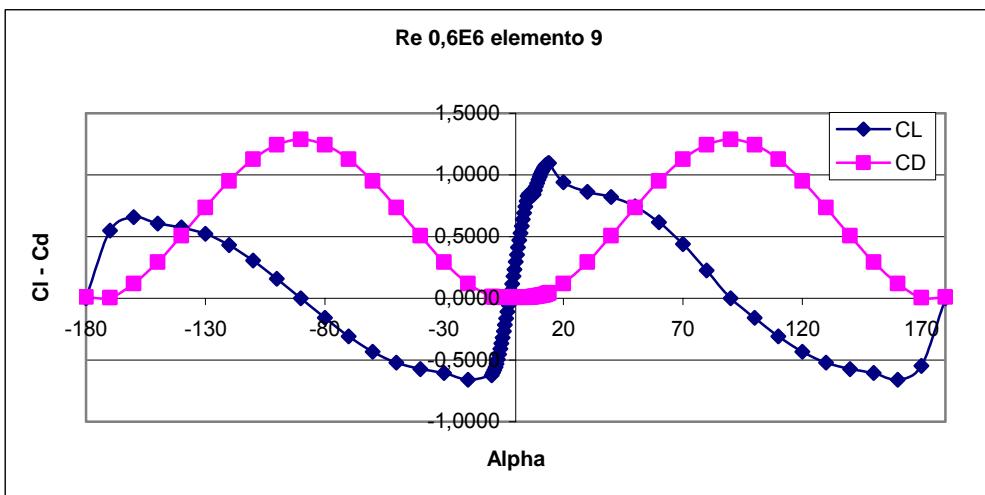


FIGURA 9. Curva en rango de 360°

2.2.3.3 Simulación de comprobación de primera aproximación

El archivo utilizado como entrada para el WT_PERF se muestra en el ANEXO 5. Este contiene la geometría y condiciones de funcionamiento obtenidos en la primera aproximación.

El resultado de esta simulación para la potencia y Cp del rotor se muestra en la FIGURA 10.

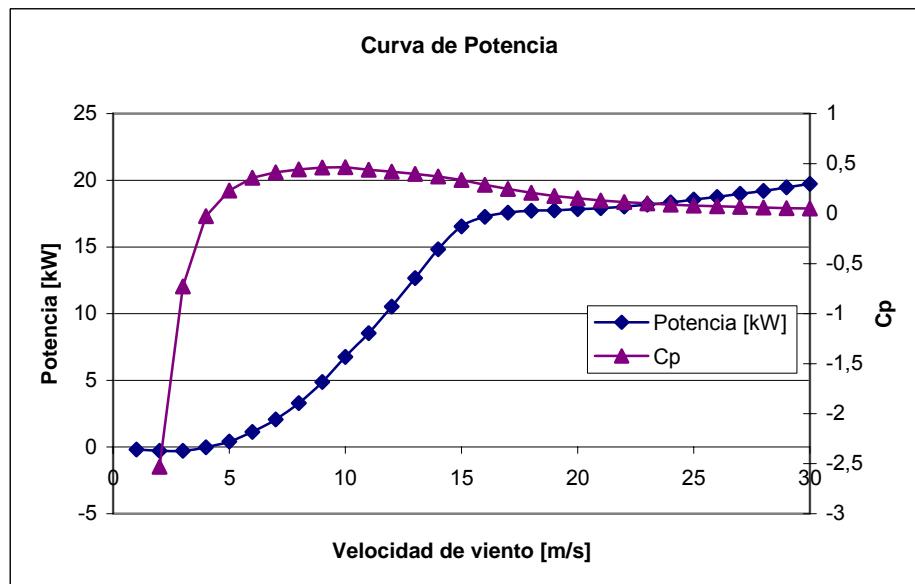


FIGURA 10. Curva de potencia y Cp de 1^a aproximación.

Esta curva muestra la potencia mecánica que podría generar este rotor hasta una velocidad de 30 m/s en caso de girar a 200 rpm y no tener ningún tipo de freno ni de control de potencia.

Se puede ver que para velocidades bajas la potencia es negativa, es decir que consumiría potencia en lugar de generárla, o simplemente que no arrancaría a con una velocidad de viento inferior a 4 m/s.

Para velocidades superiores a 15 m/s las palas entrarían en perdida aerodinámica ya que curva de potencia deja de crecer de forma cúbica para estabilizarse en una potencia entre 17kW y 20 kW.

La TABLA 2 muestra el resultado de potencia y Cp para la velocidad nominal para éstos resultados y lo hallados con el programa desarrollado.

TABLA 2. Comparación de resultados 1^a aproximación y WT_PERF

V= 9,8 m/s	Potencia [kW]	Cp
Programa desarrollado	6,417	0,4685
WT_PERF	6.415	0,4684

Los resultados encontrados son casi idénticos, lo que muestra que el problema desarrollado aunque esta limitado la cantidad de información y modos de funcionamiento que puede generar es bastante fiable para realizar un diseño correcto de la pala.

En cuanto a los resultados de cargas sobre la pala, la FIGURA 11 muestra éstos resultados.

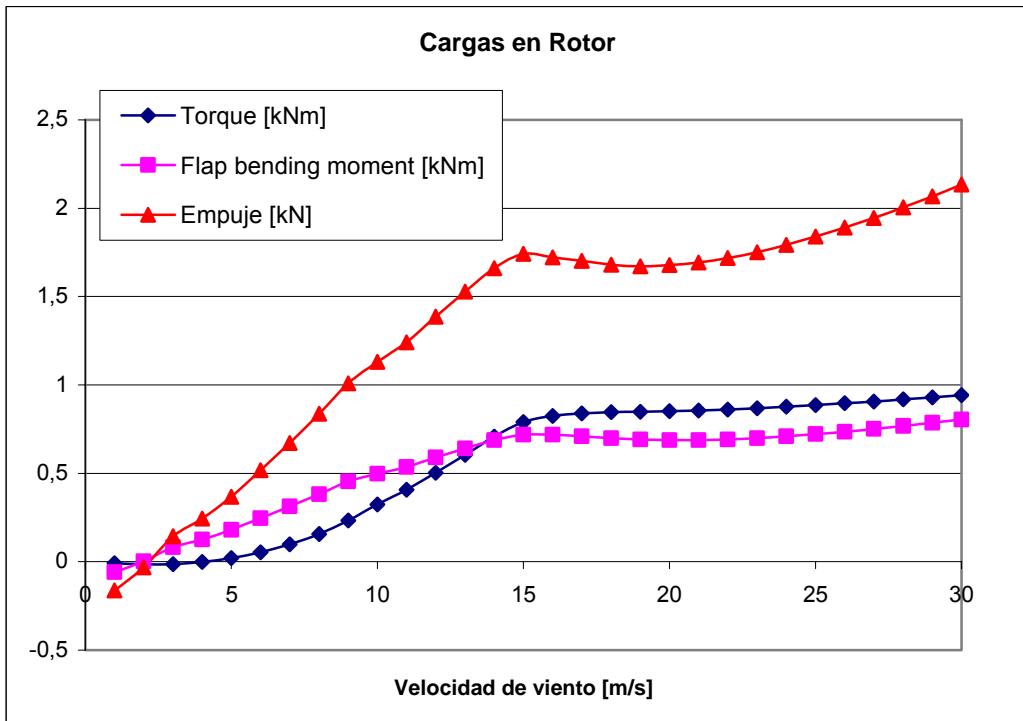


FIGURA 11. Rendimientos y curvas de carga en 1^a aproximación.

Aunque se obtienen más resultados de cargas sobre los elementos, éstos de momento no tienen trascendencia ya que hasta no llegar al diseño final éstos no serán necesarios.

A partir de ésta simulación se marcan dos pasos a seguir. El primero es cortar la cuerda para hacerla más fabricable y el segundo es conseguir un mejor arranque a bajas velocidades de viento.

2.2.3.4 Modificación de la cuerda

Tal como se comentó en los resultados de la primera aproximación, la cuerda obtenida para los elementos en la raíz de la pala aunque es buena aerodinámicamente suele cortarse para hacerla mas fabricable.

El corte se realiza según criterio del diseñador, aunque algunas recomendaciones de autores [1] la relacionan con una solidez con la cual se obtienen buenos resultados aerodinámicos y un tamaño coherente.

En este caso se ha buscado una solidez cercana a 0,2 en el primer elemento y se han cortado los siguientes hasta conseguir una pendiente casi constante.

El resultado se muestra en la FIGURA12.

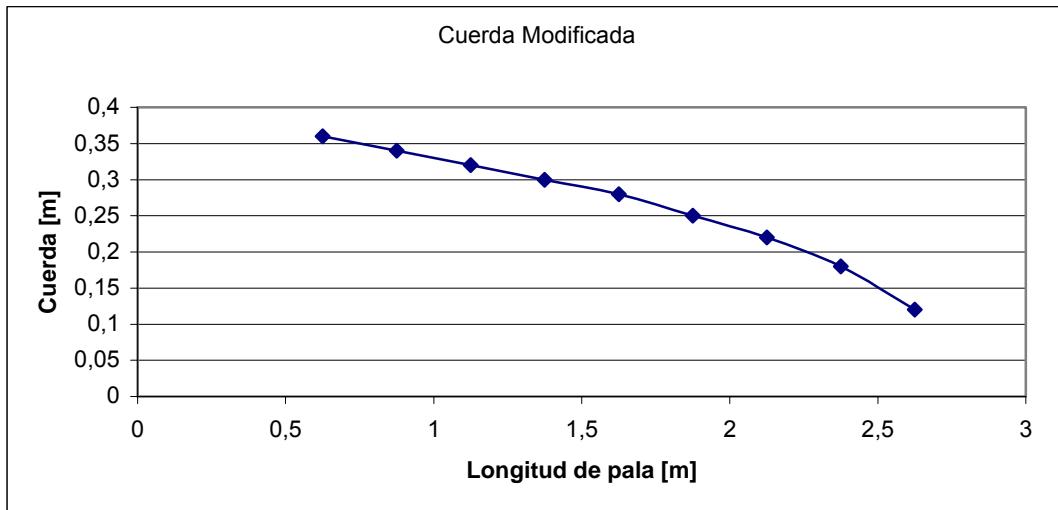


FIGURA 18. Cuerda modificada

Utilizando ésta cuerda se realizará la segunda aproximación al diseño del rotor.

2.2.5 Segunda aproximación

En WT_PERF se realiza la modificación de la cuerda según las longitudes mostradas en la FIGURA 12. El nuevo archivo de entrada se muestra en el ANEXO 6.

El resultado de curva de potencia y de Cp se muestra en la FIGURA 13

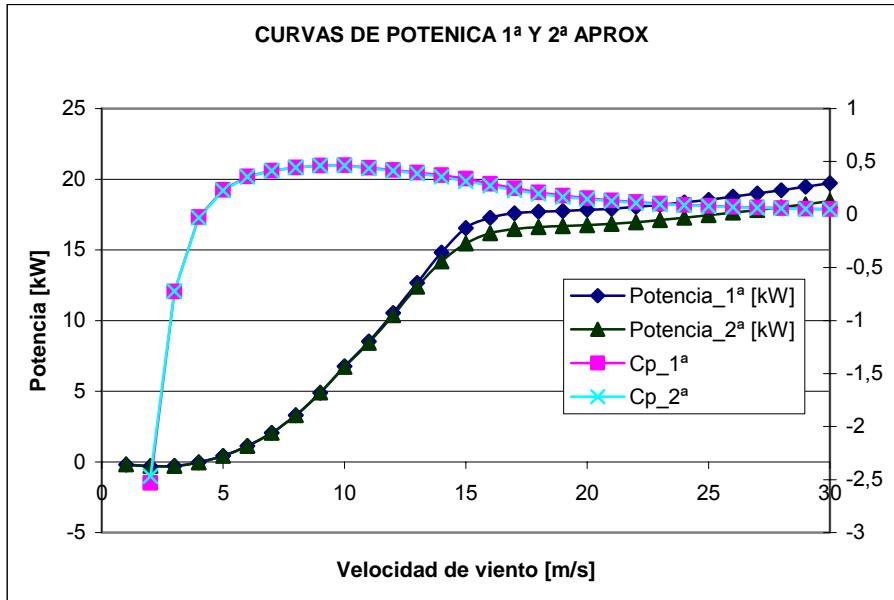


FIGURA 13. Comparación resultados 1^a y 2^a aproximación.

En esta figura se puede ver como para el rango de velocidades inferiores a la velocidad nominal la potencia es prácticamente igual para las dos configuraciones de pala y que solo existe una diferencia considerable en velocidades altas cuando la pala entra en perdida aerodinámica, que es una situación que no se dará porque antes ya se habrá hecho control de potencia para limitarla a la potencia que se entregue en la velocidad nominal.

Con estos resultados se considera aceptable la modificación de la cuerda ya que afecta muy poco la potencia y se procede a verificar si modificando el ángulo de calado se obtendría un arranque a una velocidad menor y mayor producción a vientos bajos.

2.2.6 Tercera Aproximación

La tercera y última aproximación que se realiza en el presente diseño de las palas es comprobar si modificando el calado de la pala se obtendría mayor potencia a velocidades bajas, el cual es uno de los criterios de diseño.

Para esto realizar esto se utiliza WT_PERF el cual dentro de sus capacidades permite realizar análisis de modificación del pitch de la pala. Los resultados

obtenidos para un pitch modificado equivalen a modificar el ángulo de calado general de la pala.

El archivo de entrada de este análisis se encuentra en el ANEXO 7. Dentro de éste se especifica que se realizarán 7 análisis, que son con pitch -3° hasta pitch +3° aumentando de a 1 grado. La TABLA 3 muestra los resultados obtenidos.

TABLA 3. Potencia de rotor con modificación de pitch.

Velocidad [m/s]	Pitch -3° [kW]	Pitch -2° [kW]	Pitch -1° [kW]	Pitch 0° [kW]	Pitch +1° [kW]	Pitch +2° [kW]	Pitch +3° [kW]
1	-0,49	-0,38	-0,14	-0,18	-0,28	-0,61	-0,74
2	-0,51	-0,44	-0,29	-0,29	-0,45	-0,50	-0,60
3	-0,55	-0,42	-0,34	-0,29	-0,28	-0,30	-0,38
4	-0,34	0,00	-0,09	-0,03	0,01	0,02	-0,04
5	0,13	0,27	0,34	0,41	0,49	0,51	0,47
6	0,78	0,92	1,04	1,12	1,18	1,22	1,18
7	1,70	1,84	1,96	2,06	2,14	2,19	2,13
8	2,92	3,07	3,20	3,31	3,41	3,43	3,34
9	4,50	4,65	4,78	4,90	4,99	4,96	4,82
10	6,31	6,50	6,62	6,72	6,79	6,74	6,57

El pitch 0 corresponde a la pala sin ninguna modificación, por lo cual la potencia es la misma de los resultados de la segunda aproximación. Un pitch positivo corresponde a aumentar el ángulo de ataque y pitch negativo corresponde a disminuirlo.

Se puede ver que se obtienen mejores resultados aumentando el pitch en uno o dos grados, para los cuales la potencia a 4 m/s sería positiva, aunque de tan solo 10 W.

Para la velocidad nominal aumentar 1 grado es un aumento de 70 W y para el caso de aumentar 2 grados es un aumento de 20 W. Por otra parte, aumentar grados significa acercarse más a la zona de pérdida aerodinámica cuando se está en la velocidad nominal lo que podría significar una perdida significativa de potencia a velocidades altas.

Debido a que el beneficio en potencia es muy pequeño, se decide mantener el ángulo de calado sin modificar, es decir con los resultados de pitch 0.

ANEXO 3. COMPROBACIÓN DE CARGAS

A continuación se realizará una comprobación de que los valores obtenidos para los elementos de la TABLA 7 dan como resultado los valores generales para el rotor de la TABLA 8.

3.1. Comprobación del par motor

Los valores de la TABLA 7 aparecen por unidad de longitud, lo que en este caso es que están divididos por el correspondiente dr , que para todos los elementos es el mismo que tiene un valor de 0,25 m.

Por lo tanto se debe comprobar que:

$$\left(\sum_{i=1}^9 Par/long \right) \cdot dr \cdot B = Par_motor$$

Al realizar esta operación se comprueba que el par motor es 677 Nm.

3.2. Comprobación del empuje

Al igual que para el par motor, el empuje está representado por elemento, por lo cual se debe comprobar que:

$$\left(\sum_{i=1}^9 Empuje/long \right) \cdot dr \cdot B = Empuje$$

Al realizar esta operación se comprueba que el empuje es 1555 N.

3.3. Comprobación del momento de flexión de pala

El momento de flexión total sobre la pala es la suma de la flexión generada por cada elemento sobre la raíz. En este caso la raíz sobre la cual se presentan éstos resultados es la que en el archivo de entrada del WT_PERF aparece como *Hub_rad*, que es el radio del buje.

Por lo tanto se debe cumplir que:

$$\left(\sum_{i=1}^9 (\text{Empuje / long}) \cdot dr \cdot (r_i - r_{hub}) \right) = \text{Momento_flexion}$$

Se comprueba que se obtiene un valor de 670 Nm para el momento de flexión.

ANEXO 4. GEOMETRÍA, MALLADO Y PROPIEDADES MECANICAS DE MODELO EN ANSYS

El resultado del modelo generado en ANSYS se muestra en las FIGURAS que se presentan a continuación.

La FIGURA 14 muestra una impresión de áreas.

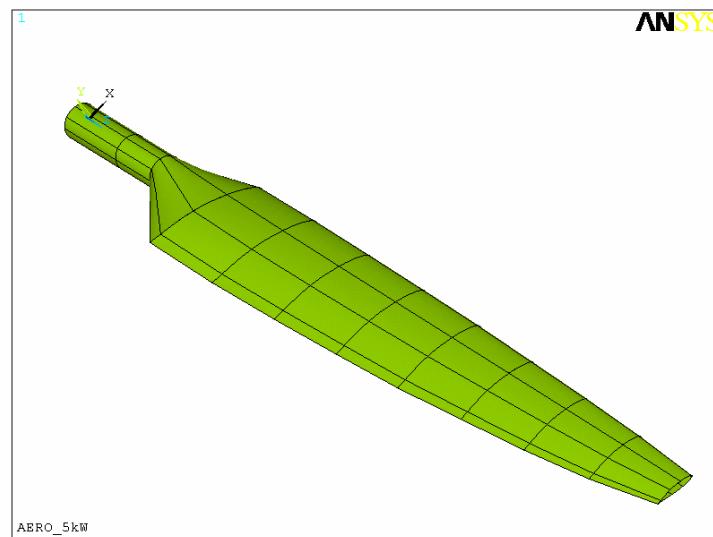


FIGURA 14. Impresión de áreas

La FIGURA 15 muestra un elemento de pala en impresión de áreas.



FIGURA 15. Detalle de elemento de pala en impresión de áreas.

La FIGURA 16 muestra el mallado general de la pala donde el numero total de elementos tipo SHELL281 es de 6794.

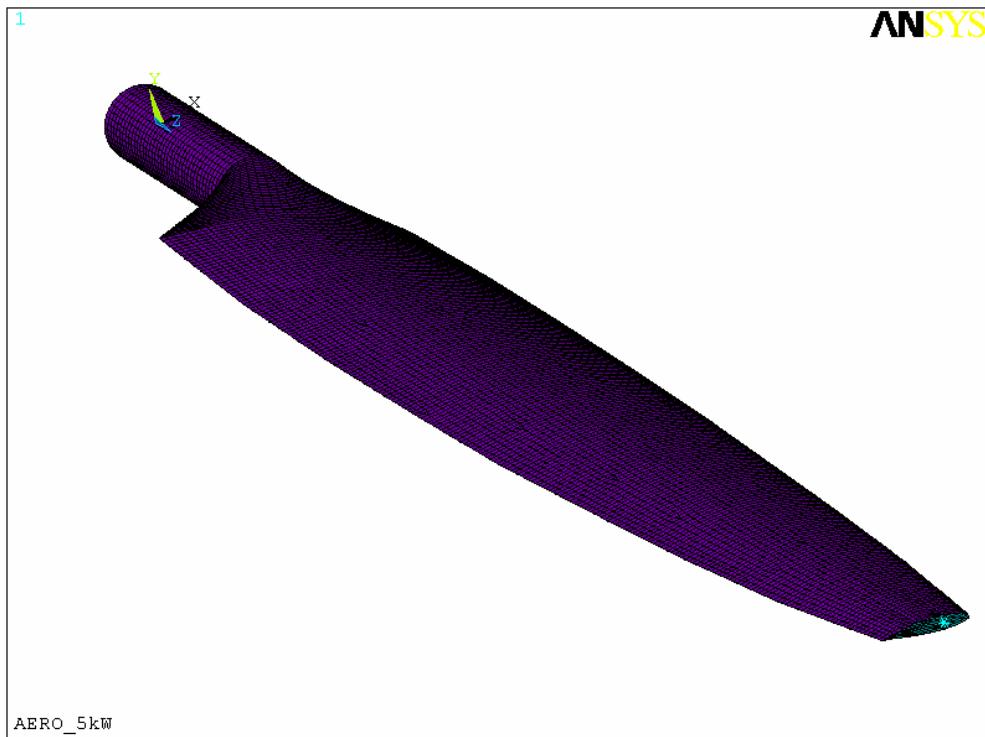


FIGURA 16. Mallado general de pala.

La FIGURA 17 muestra un detalle del mallado.



FIGURA 17. Detalle de mallado en raiz.

La FIGURA 18 muestra un detalle del mallado en el cual se puede apreciar el calado de la pala

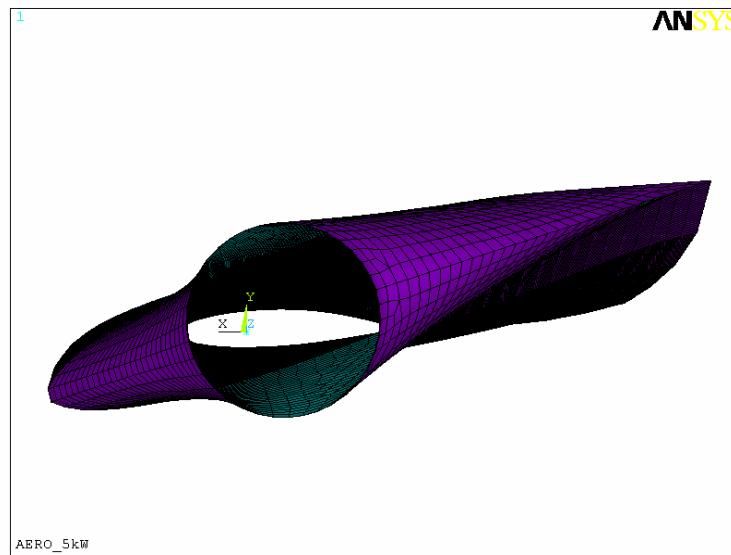


FIGURA 18. Detalle de mallado.

La FIGURA 19 muestra un detalle de mallado de un elemento de pala.

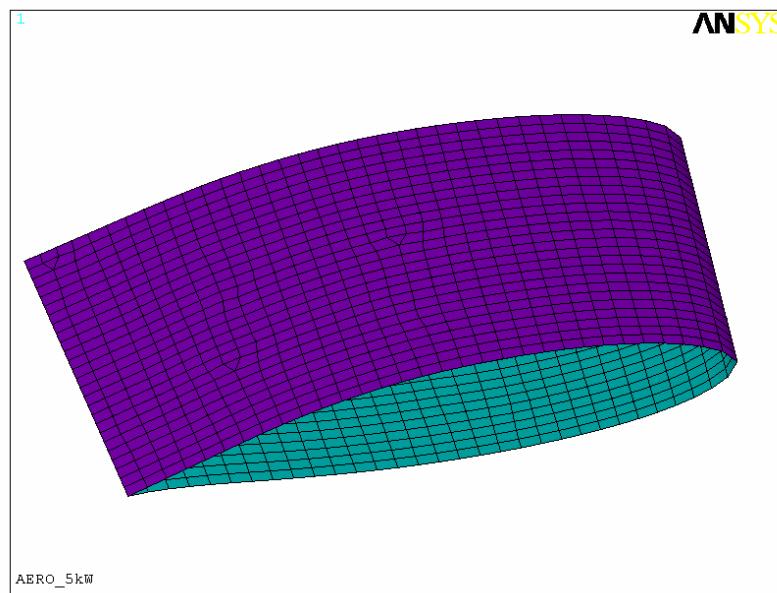


FIGURA 19. Detalle de mallado de elemento de pala

La FIGURA 20 muestra un elemento de pala con el espesor de la capa de material.

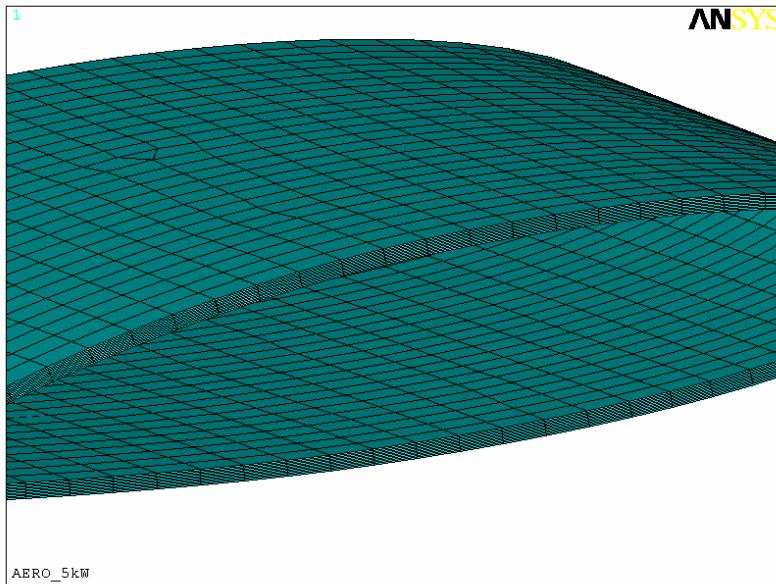


FIGURA 20. Mallado con espesor de material

Las propiedades mecánicas resultantes con el centro del origen en el centro del comienzo del entronque de la pala son las siguientes:

Centro de masa [m]:

$$XC = -0,042$$

$$YC = 0,01$$

$$ZC = 1,275$$

Momentos de inercia sobre el origen [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]:

$$I_{xx} = 14,17$$

$$I_{yy} = 14.21$$

$$I_{zz} = 0,0526$$

$$I_{xy} = 0.08744$$

$$I_{zy} = -0.0726$$

$$I_{zx} = 0.3656$$

ANEXO 5. ARCHIVO DE ENTRADA WT_PERF

COMPROBACIÓN PRIMERA ARPOXIMACIÓN.

```

----- WT_Perf Input File -----
-----
WT_Perf PRUEBA 1 5kW input file. S822(Dimen, Metric, Space, PROP-PC).
Compatible with WT_Perf v3.00f
----- Input Configuration -----
-----
True           Echo:           Echo input parameters
to "echo.out"?
True           DimenInp:        Turbine parameters are
dimensional?
True           Metric:         Turbine parameters are
Metric (MKS vs FPS)?
----- Model Configuration -----
-----
1              NumSect:        Number of
circumferential sectors.
500            MaxIter:        Max number of
iterations for induction factor.
1.0e-6          ATol:          Error tolerance for
induction iteration.
1.0e-6          SWTol:         Error tolerance for
skewed-wake iteration.
----- Algorithm Configuration -----
-----
True           TipLoss:        Use the Prandtl tip-
loss model?
True           HubLoss:        Use the Prandtl hub-
loss model?
True           Swirl:          Include Swirl effects?
True           SkewWake:        Apply skewed-wake
correction?
True           AdvBrake:       Use the advanced
brake-state model?
True           IndProp:        Use PROP-PC instead of
PROPX induction algorithm?
True           AIDrag:          Use the drag term in
the axial induction calculation.
True           TIDrag:          Use the drag term in
the tangential induction calculation.
----- Turbine Data -----
-----
3              NumBlade:       Number of blades.
2.75            RotorRad:       Rotor radius [length].
0.500            HubRad:         Hub radius [length or
div by radius].
0               PreCone:        Precone angle,
positive downwind [deg].
0.0              Tilt:           Shaft tilt [deg].
0.0              Yaw:            Yaw error [deg].
20.0             HubHt:          Hub height [length or
div by radius].

```

```

9           NumSeg:           Number of blade
segments (entire rotor radius).
    RElm      Twist      Chord   AFfile   PrntElem
    0.625     18.00     0.570    1       True
    0.875     12.40     0.460    2       True
    1.125     8.900     0.390    3       True
    1.375     6.400     0.330    4       True
    1.625     4.400     0.280    5       True
    1.875     3.200     0.250    6       True
    2.125     2.200     0.220    7       True
    2.375     1.300     0.180    8       True
    2.625     0.800     0.120    9       True
----- Aerodynamic Data -----
-----
1.225           Rho:           Air
density [mass/volume].
1.4639e-5        KinVisc:
Kinematic air viscosity
0.0             ShearExp:      Wind
shear exponent (1/7 law = 0.143).
False            UseCm:        Are Cm
data included in the airfoil tables?
9               NumAF:        Number
of airfoil files.
"SECCION 1 S822.dat"          AF_File:      List of
NumAF airfoil files.
"SECCION 2 S822.dat"
"SECCION 3 S822.dat"
"SECCION 4 S822.dat"
"SECCION 5 S822.dat"
"SECCION 6 S822.dat"
"SECCION 7 S822.dat"
"SECCION 8 S822.dat"
"SECCION 9 S822.dat"
----- I/O Settings -----
-----
True            TabDel:      Make output tab-
delimited (fixed-width otherwise).
True            KFact:       Output dimensional
parameters in K (e.g., kN instead on N)
True            WriteBED:    Write out blade
element data to "<rootname>.bed"?
False           InputTSR:    Input speeds as TSRs?
"mps"          SpdUnits:    Wind-speed units (mps,
fps, mph).
----- Combined-Case Analysis -----
-----
0               NumCases:   Number of cases to run.
Enter zero for parametric analysis.
WS or TSR   RotSpd   Pitch           Remove following block
of lines if NumCases is zero.
----- Parametric Analysis (Ignored if NumCases > 0 ) -----
-----
3               ParRow:     Row parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).
1               ParCol:     Column parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).
2               ParTab:     Table parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).
True           OutPwr:    Request output of
rotor power?

```

```
True          OutCp:           Request output of Cp?  
True          OutTrq:          Request output of  
shaft torque?  
True          OutFlp:          Request output of flap  
bending moment?  
True          OutThr:          Request output of  
rotor thrust?  
0, 0, 0       PitSt, PitEnd, PitDel: First, last, delta  
blade pitch (deg).  
200, 200, 0    OmgSt, OmgEnd, OmgDel: First, last, delta  
rotor speed (rpm).  
1, 30, 1       SpdSt, SpdEnd, SpdDel: First, last, delta  
speeds.
```

ANEXO 6. ARCHIVO DE ENTRADA WT_PERF

SEGUNDA APROXIMACIÓN.

```
----- WT_Perf Input File -----
-----  

WT_Perf DESIGN 2 5kW input file. S822(Dimen, Metric, Space, PROP-PC).  

Compatible with WT_Perf v3.00f  

----- Input Configuration -----  

-----  

True           Echo:           Echo input parameters  

to "echo.out"?  

True           DimenInp:       Turbine parameters are  

dimensional?  

True           Metric:         Turbine parameters are  

Metric (MKS vs FPS)?  

----- Model Configuration -----  

-----  

1              NumSect:        Number of  

circumferential sectors.  

500            MaxIter:        Max number of  

iterations for induction factor.  

1.0e-6          ATol:          Error tolerance for  

induction iteration.  

1.0e-6          SWTol:          Error tolerance for  

skewed-wake iteration.  

----- Algorithm Configuration -----  

-----  

True           TipLoss:        Use the Prandtl tip-  

loss model?  

True           HubLoss:        Use the Prandtl hub-  

loss model?  

True           Swirl:          Include Swirl effects?  

True           SkewWake:       Apply skewed-wake  

correction?  

True           AdvBrake:       Use the advanced  

brake-state model?  

True           IndProp:        Use PROP-PC instead of  

PROPX induction algorithm?  

True           AIDrag:         Use the drag term in  

the axial induction calculation.  

True           TIDrag:         Use the drag term in  

the tangential induction calculation.  

----- Turbine Data -----  

-----  

3              NumBlade:       Number of blades.  

2.75          RotorRad:       Rotor radius [length].  

0.500         HubRad:         Hub radius [length or  

div by radius].  

0              PreCone:        Precone angle,  

positive downwind [deg].  

0.0            Tilt:           Shaft tilt [deg].  

0.0            Yaw:            Yaw error [deg].  

20.0           HubHt:          Hub height [length or  

div by radius].  

9              NumSeg:         Number of blade  

segments (entire rotor radius).
```

RElm	Twist	Chord	AFfile	PrntElem
0.625	18.00	0.360	1	True
0.875	12.40	0.340	2	True
1.125	8.900	0.320	3	True
1.375	6.400	0.300	4	True
1.625	4.400	0.280	5	True
1.875	3.200	0.250	6	True
2.125	2.200	0.220	7	True
2.375	1.300	0.180	8	True
2.625	0.800	0.120	9	True

----- Aerodynamic Data -----

1.225	Rho:	Air
density [mass/volume].		
1.4639e-5	KinVisc:	
Kinematic air viscosity		
0.0	ShearExp:	Wind
shear exponent (1/7 law = 0.143).		
False	UseCm	Are Cm
data included in the airfoil tables?		
9	NumAF:	Number
of airfoil files.		
"SECCION 1 S822.dat"	AF_File:	List of
NumAF airfoil files.		
"SECCION 2 S822.dat"		
"SECCION 3 S822.dat"		
"SECCION 4 S822.dat"		
"SECCION 5 S822.dat"		
"SECCION 6 S822.dat"		
"SECCION 7 S822.dat"		
"SECCION 8 S822.dat"		
"SECCION 9 S822.dat"		

----- I/O Settings -----

True	TabDel:	Make output tab-
delimited (fixed-width otherwise).		
True	KFact:	Output dimensional
parameters in K (e.g., kN instead on N)		
True	WriteBED:	Write out blade
element data to "<rootname>.bed"?		
False	InputTSR:	Input speeds as TSRs?
"mps"	SpdUnits:	Wind-speed units (mps,
fps, mph).		

----- Combined-Case Analysis -----

0	NumCases:	Number of cases to run.
Enter zero for parametric analysis.		
WS or TSR RotSpd Pitch		Remove following block
of lines if NumCases is zero.		

----- Parametric Analysis (Ignored if NumCases > 0) -----

3	ParRow:	Row parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).		
1	ParCol:	Column parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).		
2	ParTab:	Table parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).		
True	OutPwr:	Request output of
rotor power?		
True	OutCp:	Request output of Cp?

True shaft torque?	OutTrq:	Request output of
True bending moment?	OutFlp:	Request output of flap
True rotor thrust?	OutThr:	Request output of
0, 0, 0 blade pitch (deg).	PitSt, PitEnd, PitDel:	First, last, delta
200, 200, 0 rotor speed (rpm).	OmgSt, OmgEnd, OmgDel:	First, last, delta
1, 30, 1 speeds.	SpdSt, SpdEnd, SpdDel:	First, last, delta

ANEXO 7. ARCHIVO DE ENTRADA WT_PERF PARA TERCERA APROXIMACIÓN. MODIFICACIÓN DE PITCH.

```

----- WT_Perf Input File -----
-----
WT_Perf DESIGN 2 5kW input file. S822(Dimen, Metric, Space, PROP-PC).
Compatible with WT_Perf v3.00f
----- Input Configuration -----
-----
True           Echo:           Echo input parameters
to "echo.out"?
True           DimenInp:       Turbine parameters are
dimensional?
True           Metric:         Turbine parameters are
Metric (MKS vs FPS)?
----- Model Configuration -----
-----
1              NumSect:        Number of
circumferential sectors.
500            MaxIter:        Max number of
iterations for induction factor.
1.0e-6          ATol:          Error tolerance for
induction iteration.
1.0e-6          SWTol:         Error tolerance for
skewed-wake iteration.
----- Algorithm Configuration -----
-----
True           TipLoss:        Use the Prandtl tip-
loss model?
True           HubLoss:        Use the Prandtl hub-
loss model?
True           Swirl:          Include Swirl effects?
True           SkewWake:        Apply skewed-wake
correction?
True           AdvBrake:       Use the advanced
brake-state model?
True           IndProp:        Use PROP-PC instead of
PROPX induction algorithm?
True           AIDrag:          Use the drag term in
the axial induction calculation.
True           TIDrag:          Use the drag term in
the tangential induction calculation.
----- Turbine Data -----
-----
3              NumBlade:       Number of blades.
2.75            RotorRad:       Rotor radius [length].
0.500           HubRad:         Hub radius [length or
div by radius].
0               PreCone:        Precone angle,
positive downwind [deg].
0.0              Tilt:           Shaft tilt [deg].
0.0              Yaw:            Yaw error [deg].
20.0             HubHt:          Hub height [length or
div by radius].

```

```

9           NumSeg:           Number of blade
segments (entire rotor radius).
    RElm      Twist      Chord   AFfile   PrntElem
    0.625     18.00     0.360    1       True
    0.875     12.40     0.340    2       True
    1.125     8.900     0.320    3       True
    1.375     6.400     0.300    4       True
    1.625     4.400     0.280    5       True
    1.875     3.200     0.250    6       True
    2.125     2.200     0.220    7       True
    2.375     1.300     0.180    8       True
    2.625     0.800     0.120    9       True
----- Aerodynamic Data -----
-----
1.225           Rho:          Air
density [mass/volume].
1.4639e-5        KinVisc:
Kinematic air viscosity
0.0             ShearExp:     Wind
shear exponent (1/7 law = 0.143).
False            UseCm:       Are Cm
data included in the airfoil tables?
9               NumAF:       Number
of airfoil files.
"SECCION 1 S822.dat"      AF_File:      List of
NumAF airfoil files.
"SECCION 2 S822.dat"
"SECCION 3 S822.dat"
"SECCION 4 S822.dat"
"SECCION 5 S822.dat"
"SECCION 6 S822.dat"
"SECCION 7 S822.dat"
"SECCION 8 S822.dat"
"SECCION 9 S822.dat"
----- I/O Settings -----
-----
True            TabDel:      Make output tab-
delimited (fixed-width otherwise).
True            KFact:       Output dimensional
parameters in K (e.g., kN instead on N)
True            WriteBED:    Write out blade
element data to "<rootname>.bed"?
False           InputTSR:    Input speeds as TSRs?
"mps"          SpdUnits:    Wind-speed units (mps,
fps, mph).
----- Combined-Case Analysis -----
-----
0               NumCases:   Number of cases to run.
Enter zero for parametric analysis.
WS or TSR   RotSpd   Pitch           Remove following block
of lines if NumCases is zero.
----- Parametric Analysis (Ignored if NumCases > 0 ) -----
-----
3               ParRow:      Row parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).
1               ParCol:      Column parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).
2               ParTab:      Table parameter (1-
rpm, 2-pitch, 3-tsr/speed).
True           OutPwr:      Request output of
rotor power?

```

True	OutCp:	Request output of Cp?
True	OutTrq:	Request output of
shaft torque?		
True	OutFlp:	Request output of flap
bending moment?		
True	OutThr:	Request output of
rotor thrust?		
-10, 5, 1 blade pitch (deg).	PitSt, PitEnd, PitDel:	First, last, delta
200, 200, 0 rotor speed (rpm).	OmgSt, OmgEnd, OmgDel:	First, last, delta
1, 30, 1 speeds.	SpdSt, SpdEnd, SpdDel:	First, last, delta