

Proyecto Fin de Carrera

Título del trabajo: MODELADO Y SIMULACIÓN
3D DE UN ROTOR DE AEROGENERADOR

Autor/es

Guillermo Sánchez Sierra

Director/es y/o ponente

Guillermo Hauke Bernardos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

2012

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres y a mi familia por todo su apoyo durante estos años, y a mis abuelos que no pudieron verlo y que tanto confiaban en mí.

Agradecer especialmente a Fernando y Guillermo, por todo lo que me han enseñado a lo largo de este proyecto y lo bien que me han tratado todo este tiempo.

Y a mis amigos por estar ahí siempre.

MODELADO Y SIMULACIÓN 3D DE UN ROTOR DE AEROGENERADOR

Resumen

En este proyecto se va a realizar un análisis aerodinámico preliminar de un rotor de aerogenerador, para ello lo primero a realizar será la geometría. Esta geometría se generará a partir de los datos de un perfil NACA 63 212 y de unos datos de diseño como son radio, cuerda y ángulo de sucesivas secciones a lo largo de una pala del rotor.

Para trazar la geometría se hará uso del programa GID versión 10.0.9 y con la ayuda de varios programas creados en lenguaje Fortran 90, de forma que se automatice la entrada de datos para generar el modelo del rotor.

Finalmente el volumen de trabajo será el volumen contenido entre las superficies del rotor y un cilindro lo suficientemente grande para que los cálculos puedan realizarse correctamente. A este volumen se le impondrán las condiciones de contorno necesarias para el cálculo y en particular se utilizarán condiciones de Euler en la zona del rotor. Estas condiciones también se introducen desde el programa GID.

Una vez hecho todo lo anterior se procederá al mallado del modelo mediante tetraedros de forma irregular y con tamaños ajustados a la necesidad de precisión del resultado y a la potencia de la máquina de cálculo.

Con la malla y las condiciones de contorno, se procederá a la resolución del modelo con la aplicación Ensa, diseñada en el área. Con los datos del resultado se calcularán distintos coeficientes adimensionales como el coeficiente de potencia, de forma que se pueda comparar estos resultados con los valores típicos de aerogeneradores y valorar la eficacia del proceso.

ÍNDICE

1. Introducción.....	Página 11
2. Generación de la geometría.....	Página 15
3. Generación de la malla.....	Página 23
4. Resolución del problema y resultados.....	Página 35
5. Conclusiones y opciones de mejora.....	Página 51
6. Bibliografía.....	Página 59
7. Anexos.....	Página 61
Anexo I	→ Comandos del programa GID
Anexo II	→ Perfiles intermedios con el programa QBlade
Anexo III	→ Programas Fortran 90 para generar el rotor

1.- Introducción

El proyecto que aquí se describe, pertenece al área de Fluidos, y contempla el cálculo y posterior análisis de un volumen de aire alrededor del aerogenerador. Lo que diferencia este cálculo de otros es que se realiza, por un lado con condiciones de Euler en la superficie del rotor del aerogenerador, por lo tanto estaremos calculando el movimiento de un fluido compresible no viscoso alrededor de las palas del rotor. Otra de las peculiaridades de este análisis es que la herramienta de cálculo no será un software comercial, sino que se empleará el programa Ensa, programado en el área, y adaptado para el modelo 3D con el que se trabaja.

Por otra parte los parámetros que definen la geometría del rotor también han sido son los datos de partida gracias a los cuales se genera toda la geometría del rotor, y están calculados previamente de forma que se maximice la potencia del rotor. En cuanto al perfil aerodinámico, se trata de un NACA 63 212, cuyos datos también se utilizan en el diseño del rotor.

El objetivo del proyecto va a ser generar un modelo resoluble del aire alrededor de un rotor de aerogenerador y comprobar el funcionamiento del programa Ensa para el cálculo de geometrías complejas en tres dimensiones, y a la vez estudiar un modelo con las condiciones de Euler. Y para ello lo que se va a realizar es un cálculo de los coeficientes aerodinámicos, de forma que se puedan comprobar resultados, la fiabilidad o aproximación de este método de cálculo.

En este aspecto, estamos limitados por la potencia de cálculo del ordenador en el cual se ejecuta la simulación, por lo tanto, la solución será tan aproximada como permita esta limitación, puesto que al ser geometrías muy grandes, la cantidad de nodos y elementos es muy elevada, y la forma de mejorar resultados es a partir de mallas más densas, las cuales aumentan más el tamaño del problema, pudiendo exceder la memoria del ordenador.

En la sección de creación de la geometría, se verá cómo se hace el modelado del rotor en el programa GID. En el anexo I se explicarán parte de los comandos del programa GID, que resultan imprescindibles para dibujar las distintas secciones de forma rápida y sencilla.

Estos comandos se obtuvieron de forma empírica, realizando las operaciones deseadas y viendo cómo se escribían estos comandos en unos ficheros de salida llamados “bach files”.

Posteriormente con esos comandos se programarán unas aplicaciones en lenguaje Fortran 90, de forma que se replicasen esos “bach files” o archivos de comandos, y conseguir así automatizar el proceso de dibujo en el programa GID. Estos programas se describen en el anexo III. Y en el anexo II se describe cómo con el programa QBlade se crean unas secciones intermedias, entre el perfil NACA 63 212 y un perfil circular, de forma que la unión pala-buje sea de forma suave y en este caso aproximada.

Hay que comentar que el modelo del rotor es un modelo ideal, puesto que no se ha contemplado el cálculo dinámico, así como las fuerzas de flexión, debido a las cuales la sección de la pala debe ser más gruesa para resistir las cargas de fuerzas.

En la sección Generación de malla, se hablará de las decisiones tomadas en cuanto a tamaño de malla, el tamaño del volumen del aire empleado, las zonas más problemáticas para el mallado y la necesidad de mayor densidad de elementos en determinadas zonas. Realmente la generación de malla es un proceso iterativo y por lo tanto la malla se genera a partir de sucesivas pruebas.

Una vez obtenida la malla se procede con la Resolución del problema, y en este punto es donde entra el programa Ensa, que se fue adaptando al tipo de problema a resolver, y en concreto para esta fase del proyecto fue necesario añadir las condiciones iniciales con rotación en el volumen, y por lo tanto se programó otra aplicación en Fortran 90.

Una vez obtenemos resultados del modelo, tenemos dos formas distintas de tratar estos resultados, por un lado podemos convertir el fichero de salida en un formato para visualizar los resultados en Tecplot, de forma que podemos ver cómo es esta solución, las distribuciones de presión, densidad, temperatura, y saber si tienen consistencia o se ven errores a simple vista. Esta herramienta es la que se emplea junto a la generación de malla y el uso de condiciones de contorno, para de forma iterativa intentar conseguir una solución correcta y lo más exacta posible.

Otra forma con la cual se va a tratar los resultados es utilizando unos ficheros de salida que contienen los datos en la superficie del aerogenerador, estos datos vienen para cada nodo que pertenece a la superficie, y para poder trabajar con ellos de nuevo se recurrió a la programación Fortran 90 para hacer aplicaciones que con esos datos calculase los coeficientes de potencia, coeficiente de par, y coeficiente de fuerza axial, además del coeficiente de lift y de drag, para poder compararlos después con los de otros modelos.

Por último se compararán estos resultados para ver la exactitud del proceso llevado a cabo para el cálculo, y se sacarán conclusiones.

2.- Generación de la geometría

El caso que se va a estudiar en este proyecto es el de un dominio cilíndrico alrededor de un rotor de aerogenerador, dicho dominio queda definido internamente por las superficies que delimitan el rotor y externamente por un cilindro, por tanto para crear el modelo es necesario primero modelar el rotor.

El modelo 3D del rotor del aerogenerador se generó a partir de secciones a lo largo del perfil para que luego al unir las se generase el volumen. Lo primero que se decidió para comenzar a dibujar el rotor era la geometría de las secciones y se trató del perfil aerodinámico NACA 63 212 (imagen 2.1). Para poder dibujar este perfil se partió de un fichero de datos con los puntos que lo definen. Una ventaja del programa GID es que este proceso se hace fácilmente introduciendo esas coordenadas cuando creas una “Línea Nurbs”

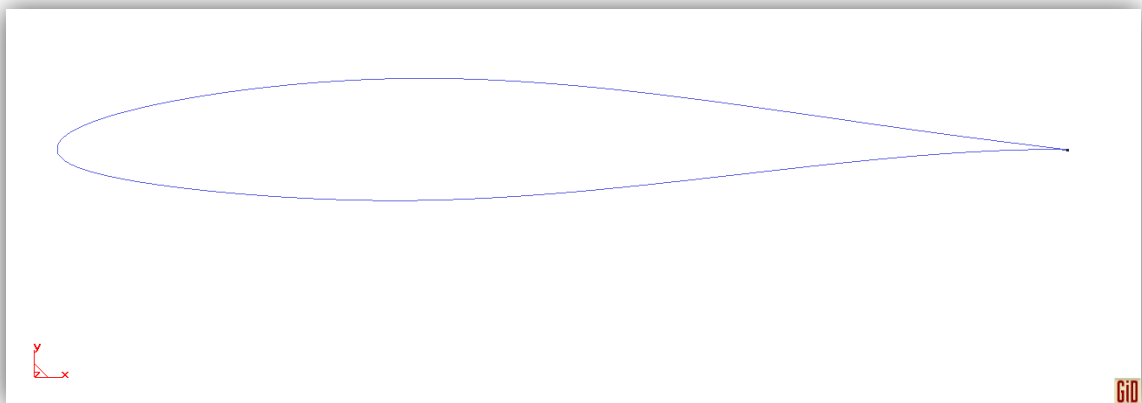


Imagen 2.1. Perfil naca 63 212 en una línea nurbs

El programa GID tiene un problema para trabajar con superficies cerradas si empiezan y acaban en el mismo punto, por ello se procedió a dividir el perfil por el otro extremo, de forma que fueran dos líneas las que definan el perfil, con la opción que se muestra en la Imagen 2.2.

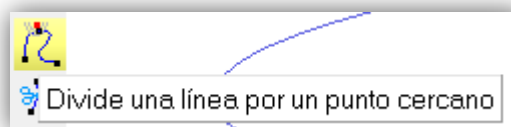


Imagen 2.2. Captura de pantalla del comando de GID

Una vez definido el perfil aerodinámico, para generar la geometría del rotor de aerogenerador se partió de un diseño previo, que fue realizado en el área y en el cual se definían distintas secciones a lo largo de una de las palas del rotor y que como datos de entrada para crear la pala se disponía de:

-*Radio*: Es la distancia desde el centro del rotor, definido por el centro del buje, hasta el perfil correspondiente.

-*Cuerda*: Es la longitud de la línea que divide en dos el perfil y que corresponde a la horizontal.

-*Tita* (θ): Es el ángulo de calado de la sección.

Debido a que todos los datos de diseño eran parámetros que editaban la posición y medidas de dichas secciones, se pensó el siguiente sistema de trabajo: Partiendo de un perfil básico, de cuerda igual a la unidad, modificarlo aumentando proporcionalmente su tamaño según el tamaño dado en la cuerda de los datos de diseño, girar el perfil según el ángulo dado tita (θ), y por último desplazarlo hasta su posición con el dato de radio. Realizando las tres operaciones para cada sección de la pala.

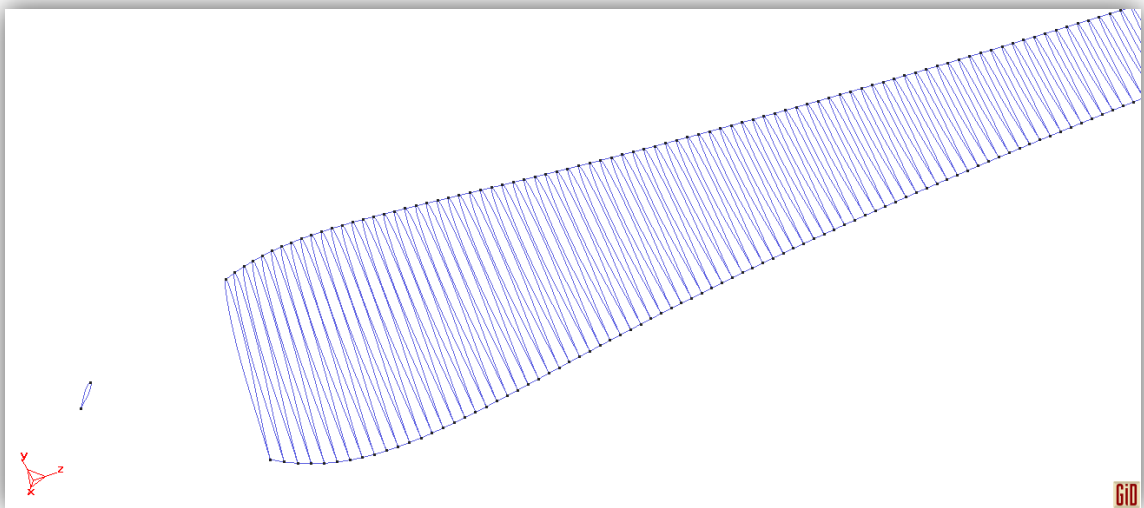


Imagen 2.3. Captura de pantalla de la generación de las distintas secciones a partir de un perfil

En la imagen 2.3 se puede observar cómo se va generando la pala del rotor.

Hay que apuntar que el rotor que se diseñó es un rotor ideal, en el caso de que fuera un modelo real, a lo largo del rotor habría perfiles distintos al ideal (NACA 63 212) puesto que la sección debería resistir grandes esfuerzos dinámicos, y por tanto se necesitaría tener una sección más gruesa que la ideal para poder aguantar sin romperse. Pero en este proyecto nos centramos en generar un modelo sobre el cual realizar los análisis, de modo que se pueda volver a repetir todo el proceso con otros modelos.

Una vez se completó el proceso de generación de las palas del rotor, se acabaron los datos de diseño, y por tanto comenzaba la tarea de construir el rotor con esas palas.

Lo primero que se precisaba era un buje, para ello se creó un volumen similar a un buje partiendo de una línea curva y realizando una figura de revolución con ella, y obteniendo con ella el buje que vemos en la imagen 2.4.

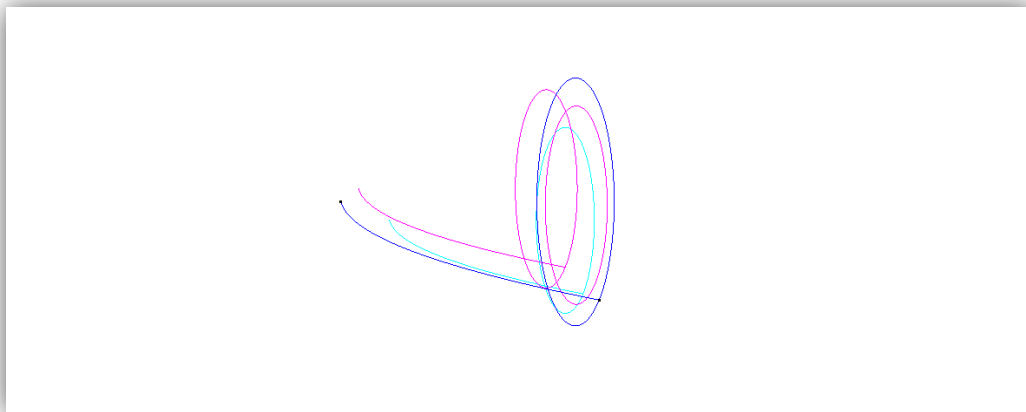


Imagen 2.4. Captura de pantalla del buje

A este buje se le realizó una serie de empalmes cilíndricos, para que de forma aproximada realizara la unión buje-pala, y así conseguir todo en un mismo volumen. Esta operación se produjo mediante la unión del volumen del buje con sucesivos cilindros, eliminando la parte que quedaba dentro del buje.

Este proceso se realizó a mano inicialmente, y luego se automatizó en un programa Fortran como se comentará en el Anexo III, de modo que se pueda cambiar el buje y recrear el modelo nuevamente. En la imagen 2.5 se puede ver el buje junto a las uniones cilíndricas.

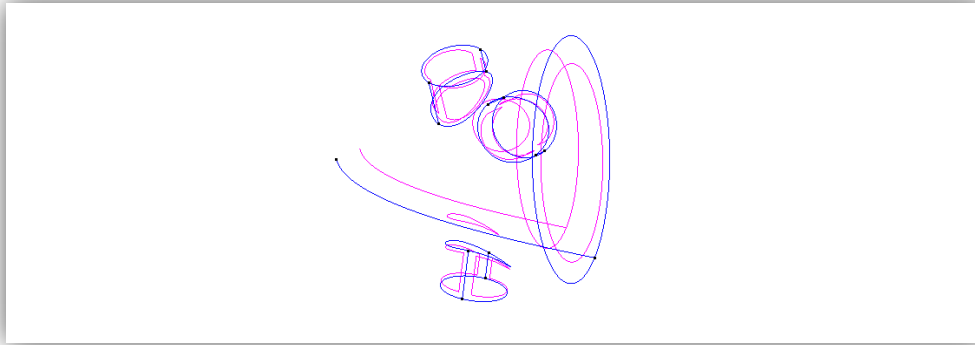


Imagen 2.5. Imagen del buje con las conexiones a las palas añadidas

Se pensó que para unir unas superficies circulares de estos cilindros a los perfiles con la geometría NACA 63 212 eran necesarias una serie de superficies intermedias, de forma que el cambio fuera suave y siguiera una forma coherente.

Para realizar estos perfiles intermedios se acudió a un programa cuya función principal es generar rotores de aerogenerador, se trata del programa QBlade, y dentro de las muchas opciones de diseño que nos ofrece se utilizó la opción de diseño directo (manual) de perfiles.

El primer paso necesario para crear estos perfiles intermedios fue introducir el perfil NACA 63 212 en el programa y posteriormente un perfil circular. Ya con los dos perfiles dentro del programa, se obtuvo los distintos perfiles intermedios tal como se observa en la imagen 2.6.

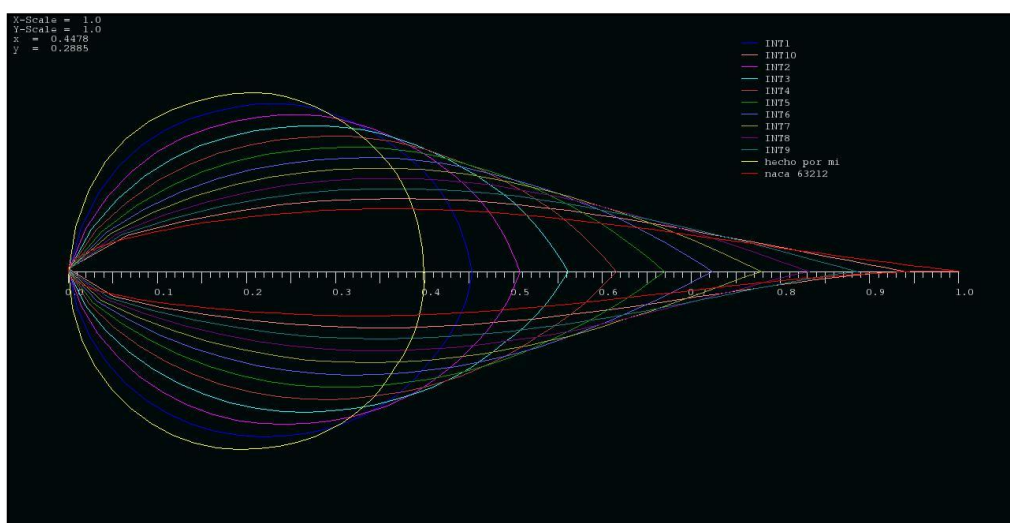


Imagen 2.6. Distintos perfiles intermedios creados desde QBlade

El mismo programa QBlade permitió exportar estos perfiles como ficheros de datos, de modo que el archivo contuviera las coordenadas de los puntos que definen el perfil. Y de nuevo para poder utilizar estos ficheros de datos el programa GID nos ofrece muchas facilidades. Pero puesto que son varios perfiles, se decidió de nuevo automatizar el proceso, en parte para que se puedan cambiar los perfiles en caso de hacer otro modelo distinto, y para reducir el tiempo de esta tarea. En el Anexo II se explica en profundidad el proceso de generar estos perfiles intermedios con el programa QBlade, mientras que en el Anexo III incluye una descripción del programa Fortran dedicado a generar la geometría de los perfiles intermedios.

Por tanto, en otro fichero tendremos las tres zonas de perfiles intermedios, tal como refleja la imagen 2.7.

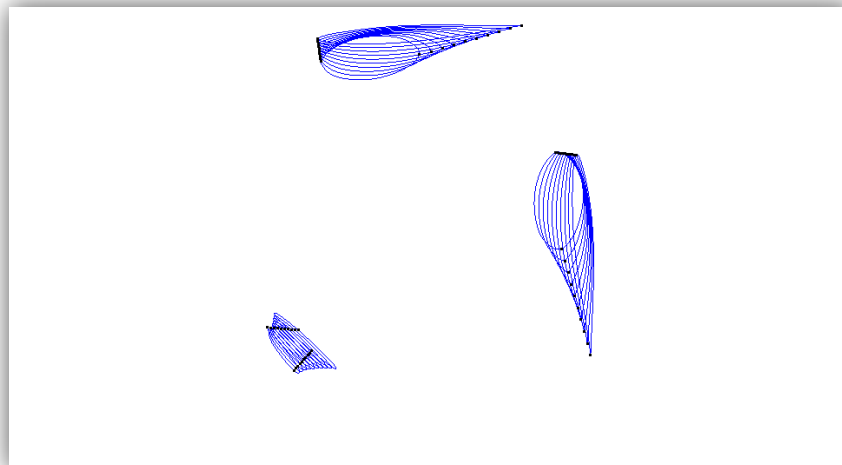


Imagen 2.7. Perfiles intermedios importados en Gid

Recapitulando; se tiene, por un lado el buje con las conexiones cilíndricas, por otro lado los perfiles intermedio y por último están las tres palas. Con esto ya se puede construir el modelo del rotor completo, puesto que el programa GID ofrece nos permite a una geometría importarle otra distinta que esté en otro archivo de GID. Por tanto, teniendo las tres partes en tres archivos distintos, no queda más que unirlas como si de un puzzle se tratase. En las siguientes imágenes se muestra el montaje.

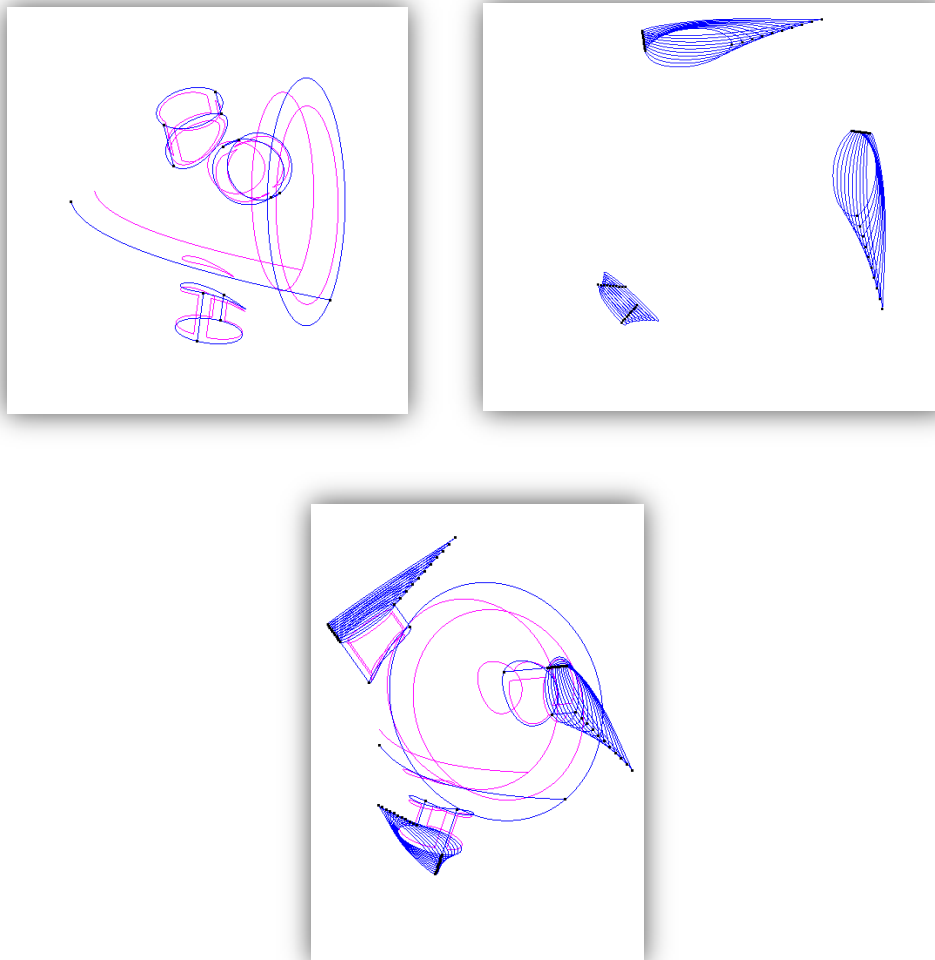


Imagen 2.8. Imagen del buje comenzando a unirse a los perfiles intermedios

En la imagen 2.8 se muestra el buje junto a los perfiles intermedios

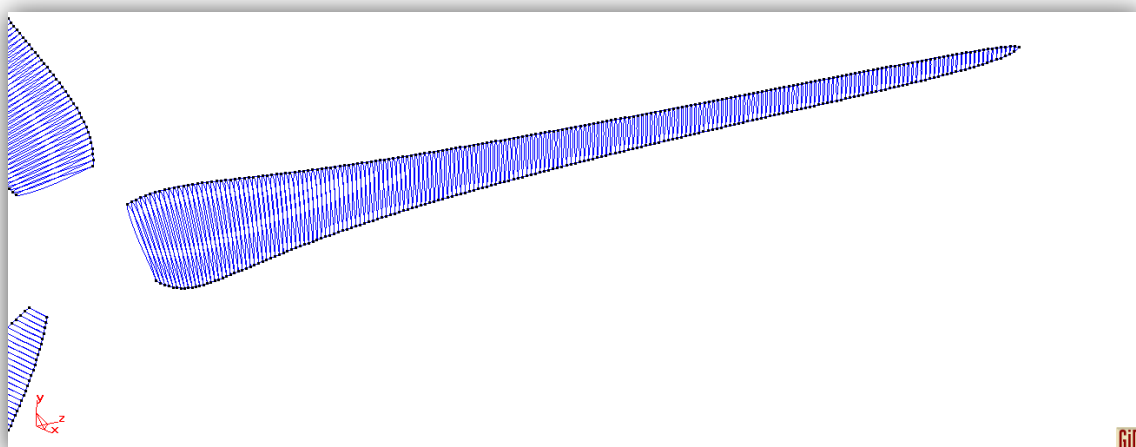


Imagen 2.9. Captura de pantalla de las palas completas

Para facilitar la generación de superficies, en el archivo de las palas se crean ya las palas con las superficies, de modo que sólo falten en la zona intermedia.

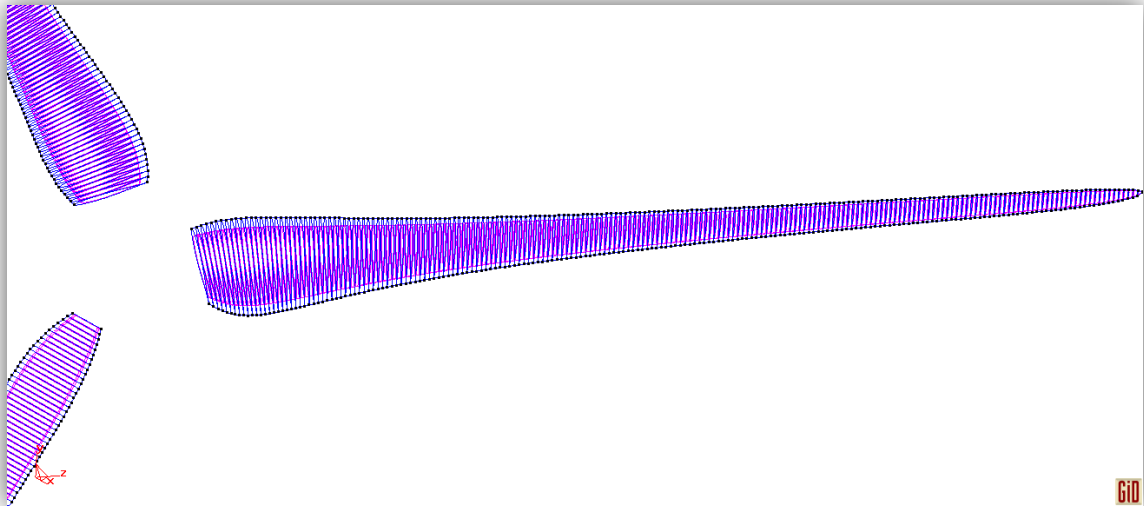


Imagen 2.10. Palas completas con las superficies añadidas

En la imagen 2.9 teníamos las palas sin superficies, y en la imagen 2.10 tenemos ya en un mismo archivo las palas con las superficies generadas. El principal motivo de generarlas sin juntar todavía, es porque en este punto las líneas que definen las superficies están ordenadas de forma coherente según han sido creadas, y por tanto resulta mucho más fácil a la hora de programar el tener orden lógico en las variables. De nuevo el proceso de generar las superficies de las palas será con una aplicación de Fortran 90.

Por último sólo falta importar las tres geometrías de archivos GID en un solo archivo, y completar las superficies que nos quedaban en la zona entre las palas y el buje. De modo que nos queda el modelo tal como se muestra en las imágenes 2.11 y 2.12

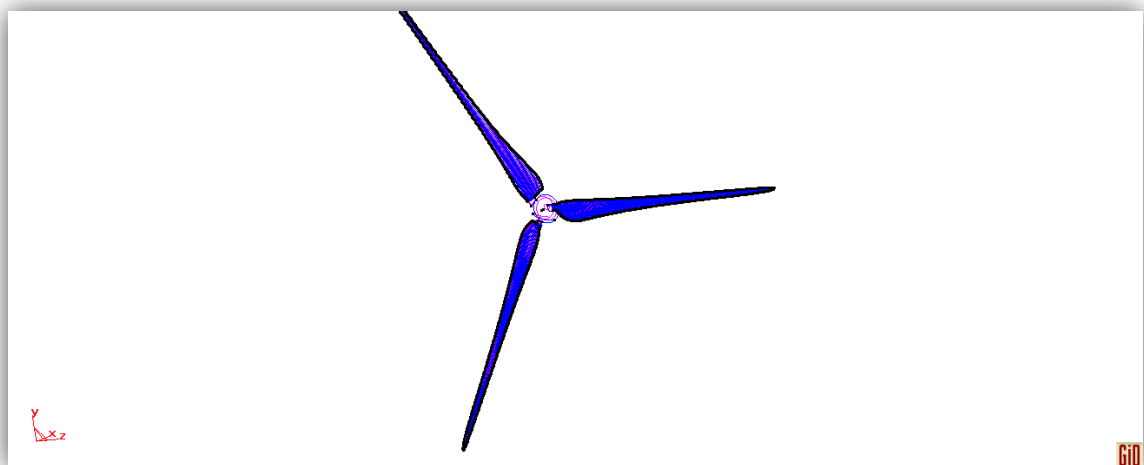


Imagen 2.11. Modelo del rotor de aerogenerador completo

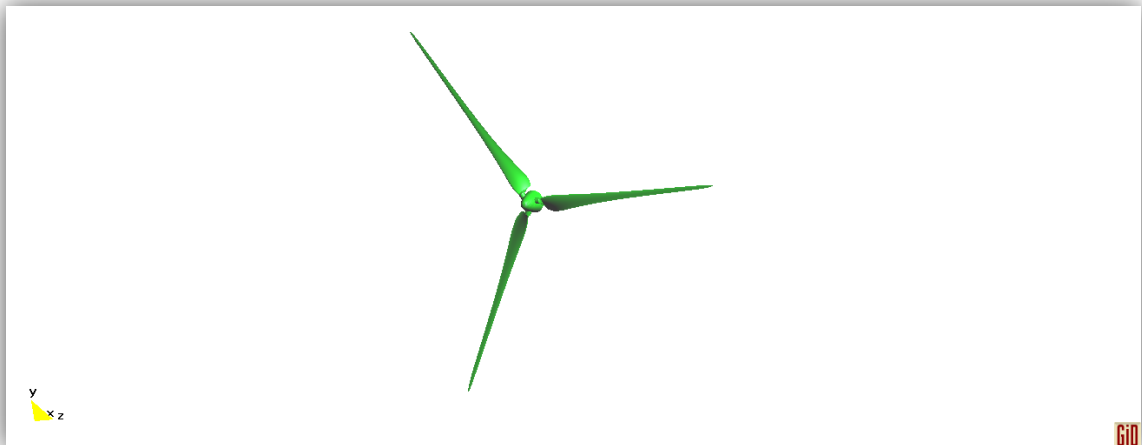


Imagen 2.12. Render del rotor de aerogenerador completo

Para comprobar que el modelo del rotor era correcto se malló de forma individual, de modo que si no daba problemas con el rotor solo, no fallase una vez introducido dentro del cilindro al generar el volumen de trabajo.

Resumiendo la explicación de la generación de la geometría se partió de unos datos de diseño y a partir de ahí se creó todo el rotor del aerogenerador, programando de propio las distintas aplicaciones de Fortran 90. Y toda la generación de geometría se realiza con la opción de importar archivo de comandos, que es el formato de salida de los programas Fortran creados y prácticamente no hay que realizar ninguna operación a mano.

3.- Generación de la malla

El proceso de generación de malla es un proceso iterativo, lo cual quiere decir que la elección de la malla inicialmente es algo aleatorio. Viendo los resultados que se pueden obtener con cada malla, hay que ir retocando el tipo de mallado, el tamaño en cada zona, y en general, muchos factores que influyen en el resultado del problema.

Uno de los principales factores que más afectan la limitación que existe en la memoria del ordenador empleado para calcular, esto choca con la necesidad

de un volumen suficientemente grande para que no se vean afectados los cálculos por las condiciones de contorno, y a su vez, choca con la necesidad de una malla muy densa en ciertas zonas del rotor para conseguir un resultado lo más exacto posible.

Dicho lo cual, lo primero a realizar es un cilindro de aire lo suficientemente grande para que no se vean afectados los cálculos para aproximar el infinito.

Se comenzó como primera aproximación con un cilindro de radio 260 metros, número que es cinco veces el radio del rotor, que es 52. Pero en este caso se observaron anomalías en las soluciones y se acabó optando por un cilindro de radio 390 metros y 390 metros de altura, es decir, un 50% más de radio.

Por otro lado, el rotor debe situarse más cerca de la entrada, de este modo se situó a 80 metros de la entrada y a 310 metros de la salida, para dar tiempo al flujo una vez pasado el rotor y así adaptarse a las condiciones ambientales. Definitivamente se utilizaron estas dimensiones para los modelos, puesto que en las simulaciones se observó que desaparecían los problemas de adaptación del flujo.

El modelo correspondiente a un volumen de aire alrededor del rotor es el que se muestra en las imágenes 3.1 y 3.2.

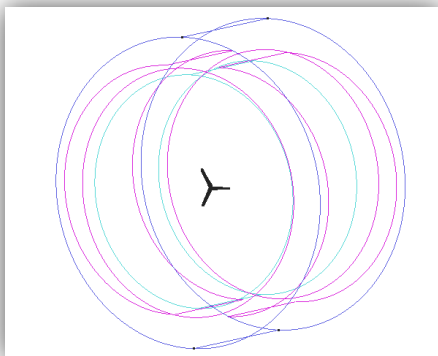


Imagen 3.1. Volumen de trabajo

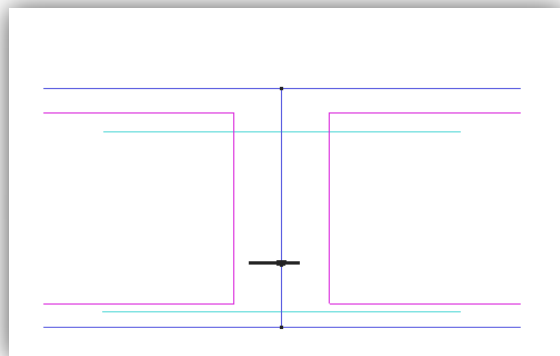


Imagen 3.2. Alzado del volumen de trabajo

Una vez decidido el tamaño del cilindro que define el volumen de trabajo, viene la decisión del tamaño de malla máximo. Este parámetro afectará a las caras externas del cilindro, es decir, a las zonas lejanas al buje, y lo debemos controlar debido a la limitación de la memoria del ordenador. Se fue probando a ir aumentando el tamaño hasta que se observaba que ya no había una reducción importante en el número de nodos y de elementos, con lo cual se acabó decidiendo por un tamaño máximo de 21 metros.

Este tamaño sólo se alcanzará en las zonas cercanas a las superficies del cilindro, de forma que no se afecten los resultados, teniendo una malla mucho más fina en la zona del rotor, que es donde mayor necesidad de elementos tenemos. Aquí no está claro cuál es el tamaño óptimo para obtener los mejores resultados, puesto que, bajar el tamaño máximo de la malla en la zona del rotor conlleva un incremento importante en el número de nodos y de elementos, pero lo que si se consiguió es bajar lo suficiente para ver que los resultados mejoraban cuanto más densa es la malla y por tanto menor el tamaño en las superficies del rotor.

En este punto es donde mayores complicaciones se encontraron, de forma que se fueron haciendo distintos ensayos, de modo que se pudiera ir comprobando paso a paso hasta conseguir un modelo válido.

El siguiente paso antes de proceder al mallado y el posterior cálculo del modelo será el imponer las condiciones de contorno. Las condiciones de contorno las imponemos desde GID mediante un “tipo de problema” creado en el departamento, y al cual se le adaptó una opción para incluir la condición de rotación. En la imagen 3.4 se muestra el menú en el cual se introducen las condiciones de contorno.

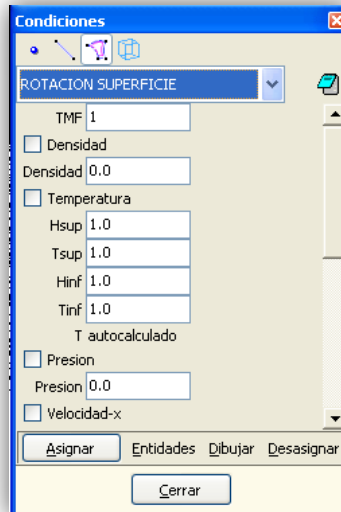


Imagen 3.4. Menú de condiciones de contorno

El modelo está pensado para ser el aire alrededor del aerogenerador, y por tanto si fijamos el rotor y vemos el aire desde el punto de vista relativo al rotor, el aire estará girando. Con esta idea en mente se imponen las siguientes condiciones de contorno:

- En la entrada → Se fija la densidad, velocidad angular y velocidad del viento.
- En las paredes laterales → Se define la temperatura.
- En la salida → Se define la presión en la salida.

En la salida se ha fijado la presión atmosférica, de modo que el fluido en ese punto esté con las condiciones de un hipotético infinito. El hecho de definir la temperatura es porque el problema se resuelve mejor cuando se define la temperatura, hecho deducido durante las simulaciones que se fueron realizando.

Pero es una temperatura que se calcula a partir de la presión atmosférica y la densidad, las cuales son datos en los otros contornos, de forma que las paredes laterales son en teoría salidas de fluido también.

Hay que comentar que se valoró la posibilidad de hacer un cálculo como si fuera un túnel de viento, imponiendo condiciones de velocidad y rotación en las paredes pero finalmente se decidió descartar esta idea.

A la vez que se han ido imponiendo las condiciones de contorno anteriores, se fueron asignando las condiciones de Euler en las superficies del rotor, y entre otras cosas, se asignó a las superficies del rotor la condición de “flux.output”, la cual nos sirve para que cuando se calcule el problema, tengamos un fichero de datos aparte, con todos los datos sobre esos nodos. Y con esos datos se calcularán los coeficientes aerodinámicos anteriormente mencionados.

En la imagen 3.5 se muestra una captura de pantalla de los bordes de malla, viendo como en la parte exterior la malla es muy grosera y en la interior, en el rotor, la malla es mucho más fina.

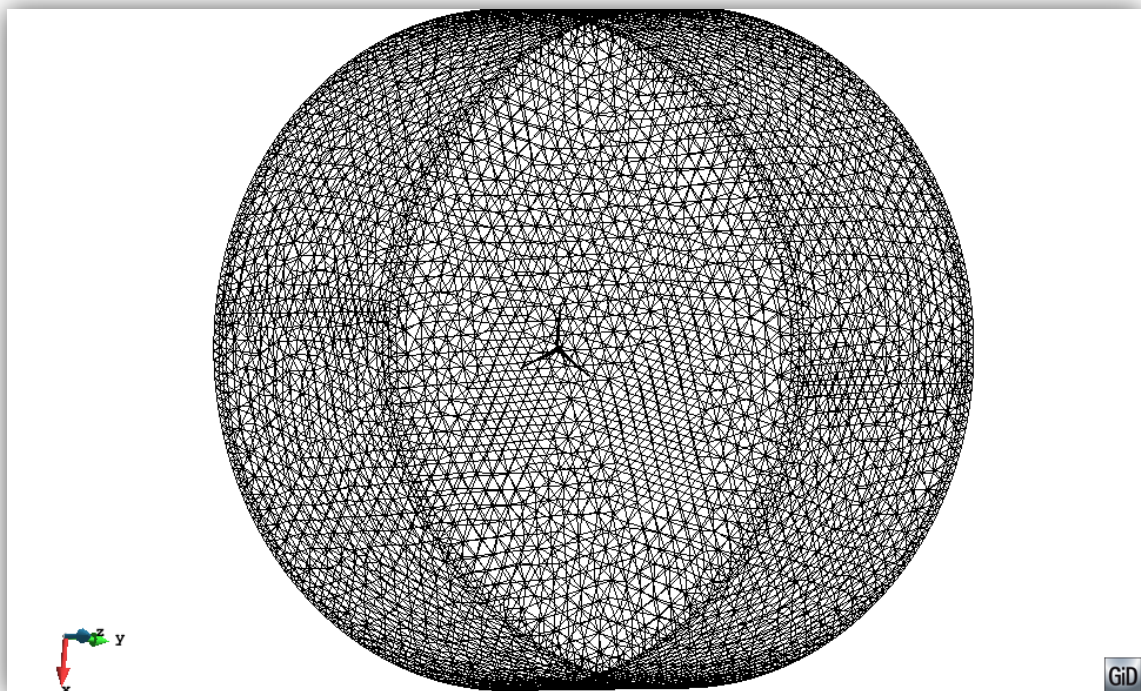


Imagen 3.5. Captura de Gid de los contornos de malla del volumen de trabajo

Una vez introducidas las condiciones en el programa GID, y obtenido el archivo de cálculo que utilizaremos para los cálculos, se procedió a realizar una serie de pruebas con el objetivo de encontrar la mejor manera de obtener resultados adecuados uniendo, por un lado, las limitaciones computacionales y por otro lado las necesidades de un mallado adecuado.

Modelo con una sola pala con tamaño de elementos

En este modelo se probó la opción de mallar una sola pala con elementos de tamaño menor, de forma que ahorrásemos trabajo computacional, y luego observando los resultados. Tal y como se muestra en la imagen 3.6.

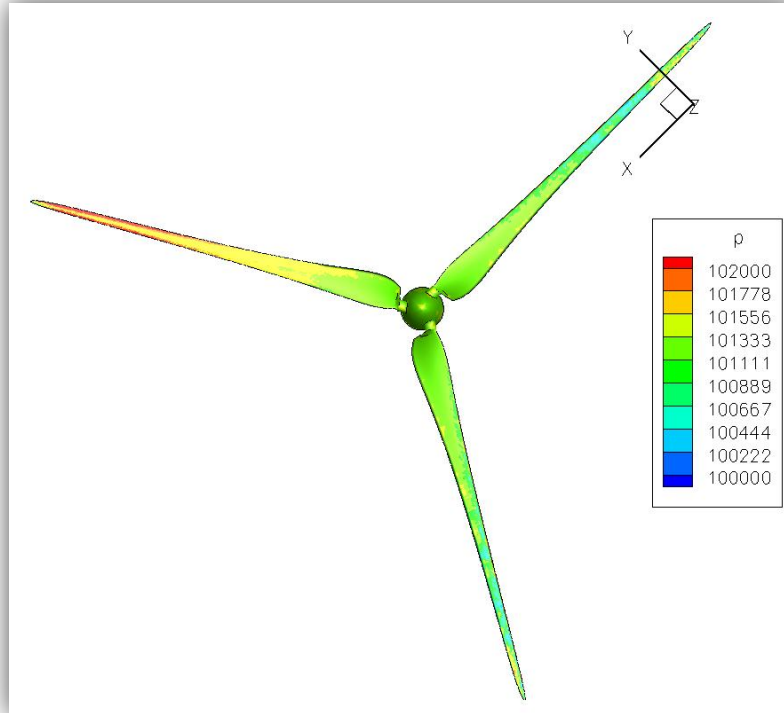


Imagen 3.6. Modelo con una sola pala mallada con menor tamaño de elementos

En este caso además de que la aportación de las otras palas puede influir en los resultados, se observa de forma muy pronunciada cómo afecta el tamaño de malla, puesto que en las palas que no están con tamaño de elementos menor se ve claramente unas presiones más bajas de lo esperado.

Modelo con mayor número de elementos en el borde de ataque

Una de las cosas que se intentó fue realizar una malla más refinada en la zona del borde de pala, que es una zona muy importante de la simulación. Esta idea surgió de la necesidad de no sobrepasar los límites de memoria y conseguir una malla de menor tamaño.

Para conseguir una malla que se adaptase a las necesidades, se modificaron los programas Fortran en los cuales se generaban las palas, para hacer superficies en el borde de ataque, y posteriormente aumentar la densidad de malla en esas zonas en concreto. En la imagen 3.3 se hace una captura de pantalla de cómo se intenta que sea la malla en la zona de la pala, aumentando la densidad de elementos en la zona del borde de ataque

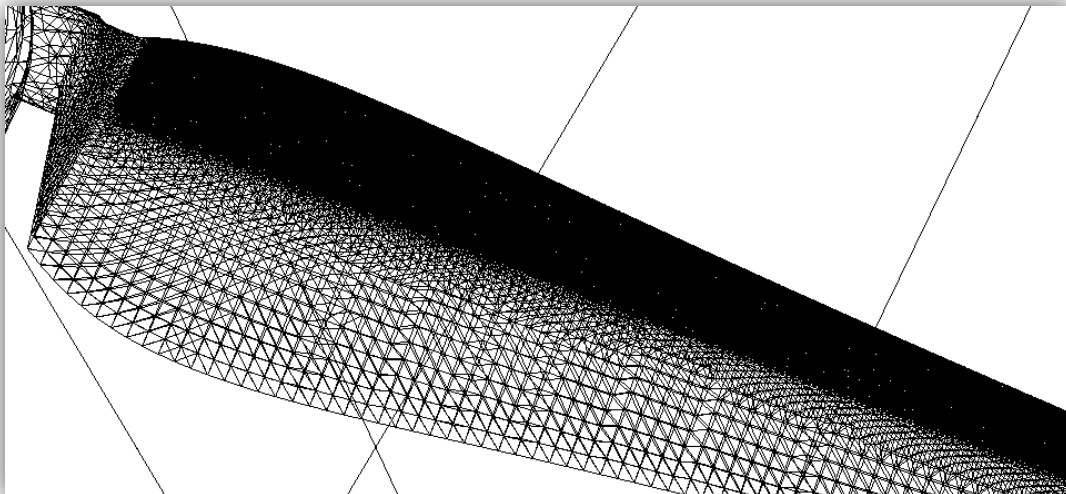


Imagen 3.3. Borde de ataque con un tamaño de malla menor

Los resultados en este tipo de mallado no fueron lo suficientemente adecuados, puesto que se observaba un salto de presión entre la zona de malla más refinada y la grosera, que proviene principalmente del cambio de tamaño de malla. Como se puede observar en la imagen 3.4

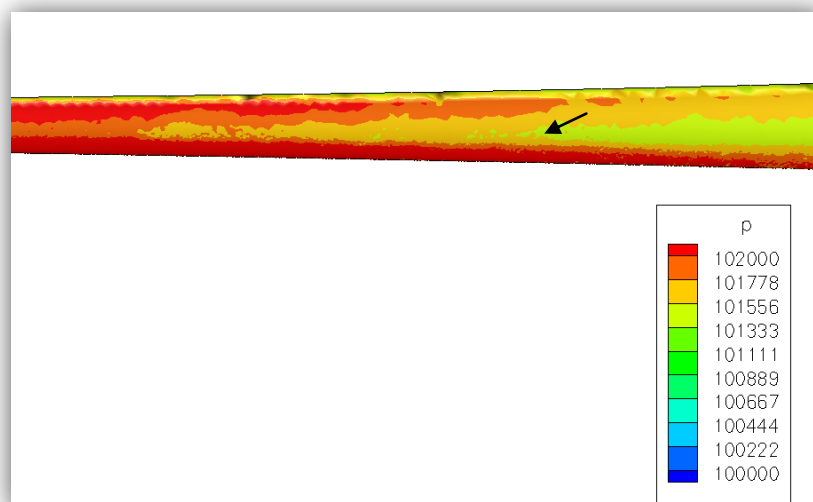


Imagen 3.4. Captura de Tecplot del modelo con el borde de ataque con malla más fina

Este modelo se acabó descartando debido a que no son fiables los resultados si el cambio de presión coincide justo con la transición de tamaño de malla, porque podría ser justo ese el motivo del cambio. Además se observan irregularidades en el otro borde de la pala.

Prueba con distintos tamaños de malla en la zona del rotor.

Lo primero que se comprobó fue que el tamaño de malla en la zona del rotor influye mucho en los resultados, lógicamente al ser una geometría compleja el tamaño debe ser muy pequeño para adaptarse lo mejor posible a la forma del perfil. Aun así en este punto es donde mayor conflictos hay, puesto que por un lado necesitamos tamaños de elementos muy pequeños para las soluciones y por otro lado la potencia de computación nos limita hasta dónde podemos bajar ese tamaño de elemento.

Ante los resultados observados en el modelo anterior, se decidió mallar toda la geometría del rotor con un mismo tamaño de elementos.

Una primera aproximación fue calcular el problema con un tamaño de malla de 0.1 metros en la zona del rotor, con los siguientes resultados expuestos en la imagen 3.5.

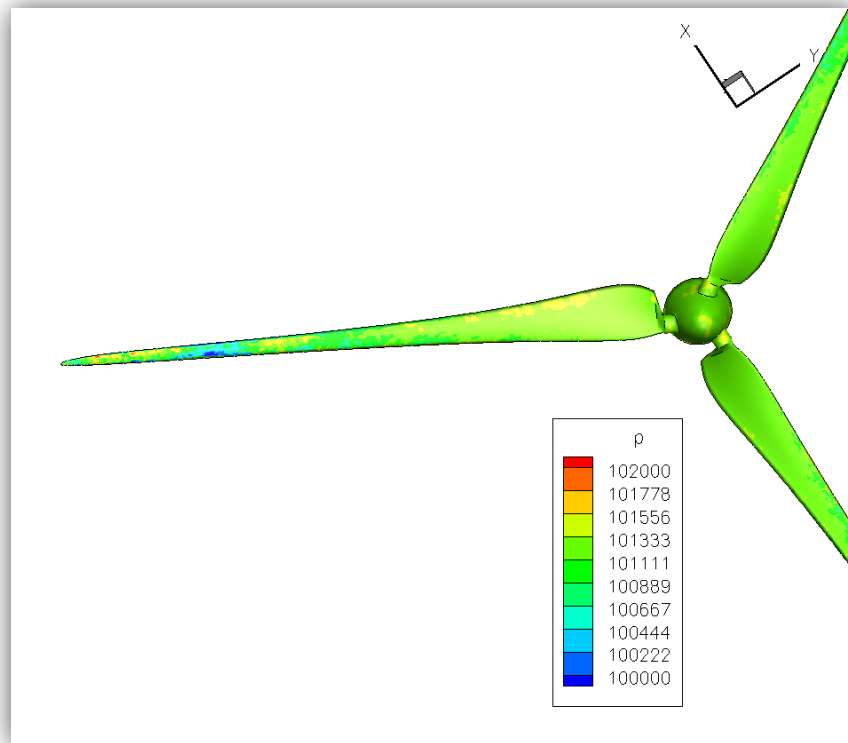


Imagen 3.5. Captura de Tecplot del modelo con tamaño de elementos 0.1

En este modelo la principal conclusión que se saca es que si el tamaño de elemento no es el suficiente, el problema no se calcula de forma adecuada. En la imagen 3.5 observamos que siendo la misma graduación de presiones que en el caso de la imagen 3.4, se observa en la cara de incidencia del aire, una presión muy por debajo de lo que debería, e inclusive una zona de presión por debajo de la atmosférica en medio de la pala.

Todo esto nos lleva a descartar este tamaño de malla debido a su baja aproximación al resultado esperado.

Tras la malla de tamaño de elemento 0.1, se pasó a simular un modelo con este tamaño de malla algo menor, 0.08. Hay que decir que ese tamaño que implica una reducción del 20%, en la malla generada en el rotor se genera un incremento mucho mayor al 20% en cuanto a número de nodos.

Los resultados de esta simulación se muestran en la imagen 3.6.

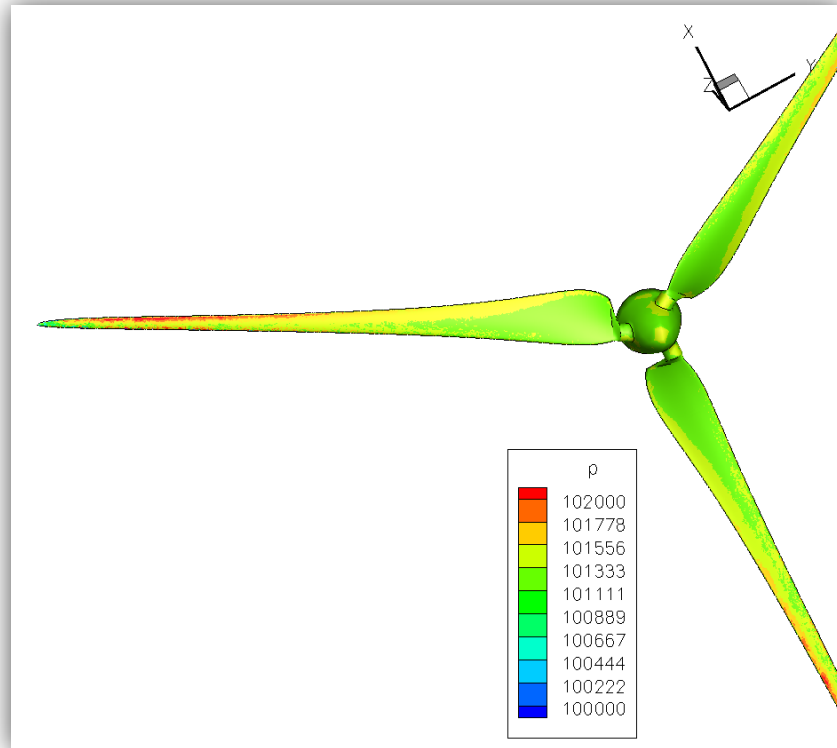


Imagen 3.6. Captura de Tecplot del modelo con tamaño de elementos 0.08

En este modelo ya se empieza a ver una distribución de presiones mucho más coherente, sin zonas de presión por debajo de lo esperado, pero sin embargo en el borde de ataque no se observa una presión alta como era de esperar, y esto se achaca a que la geometría del borde de pala es la que mayor curvatura tiene, y recordemos que con elementos estamos aproximando esa línea curva a través de líneas rectas, con lo cual este modelo tampoco es válido. Pero se comprueba una gran mejoría con la reducción del tamaño de los elementos.

A continuación se hicieron sucesivas prueba reduciendo el tamaño de malla y comprobando con Tecplot la coherencia de las distribuciones de presión a lo largo de las palas, de forma que una vez el modelo sea coherente se pasara a la fase de cálculo en profundidad de los coeficientes aerodinámicos.

En las imágenes 3.7 y 3.8 se muestran los modelos para los tamaños de elementos 0.06 y 0.05.

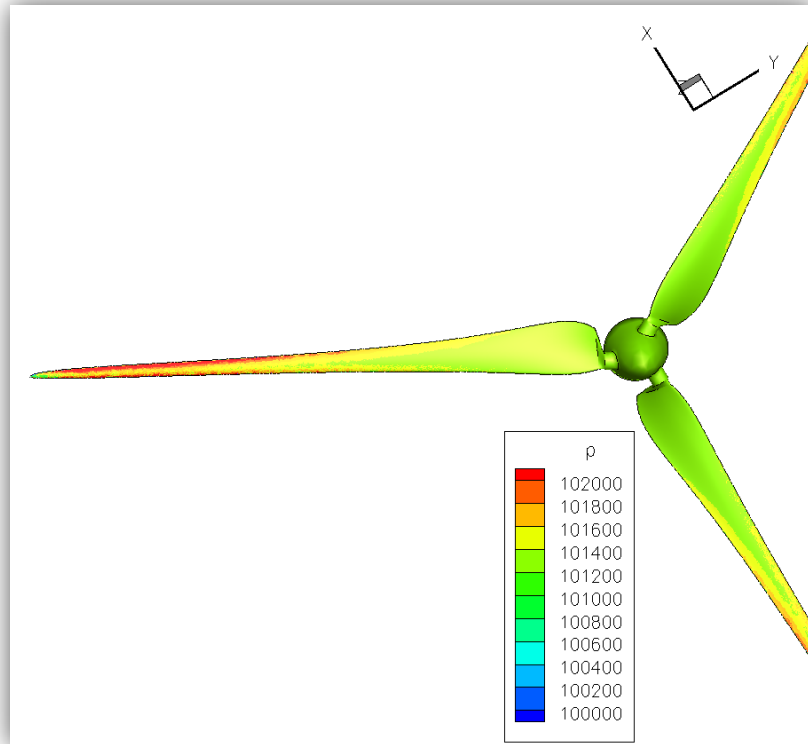


Imagen 3.7. Captura de Tecplot del modelo con tamaño de elementos 0.06

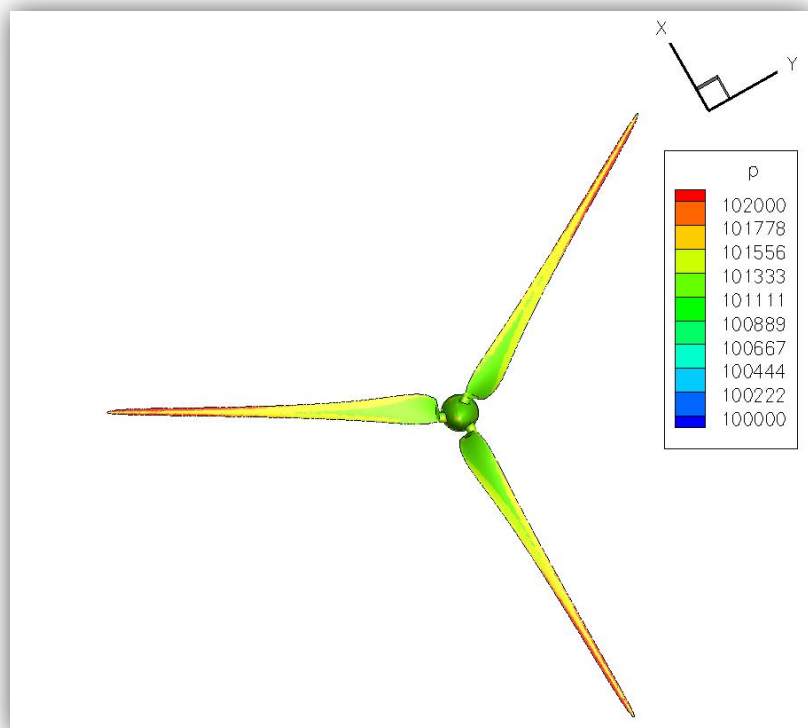


Imagen 3.8. Captura de Tecplot del modelo con tamaño de elementos 0.05

En el caso del tamaño de elementos de 0.06 se observó mejoría en cuanto a las distribuciones de presiones, pero se veía que en la zona de la punta de la pala, donde el número de elementos por sección ya es mucho menor, se volvía a ver presiones más bajas de lo esperado. Hecho que se corrigió en el modelo con el tamaño de 0.05, en el cual las puntas en concreto se mallaron con un tamaño de malla menor, dando lugar a una mayor consistencia de la distribución de presiones. Se puede ver en la imagen 3.9.

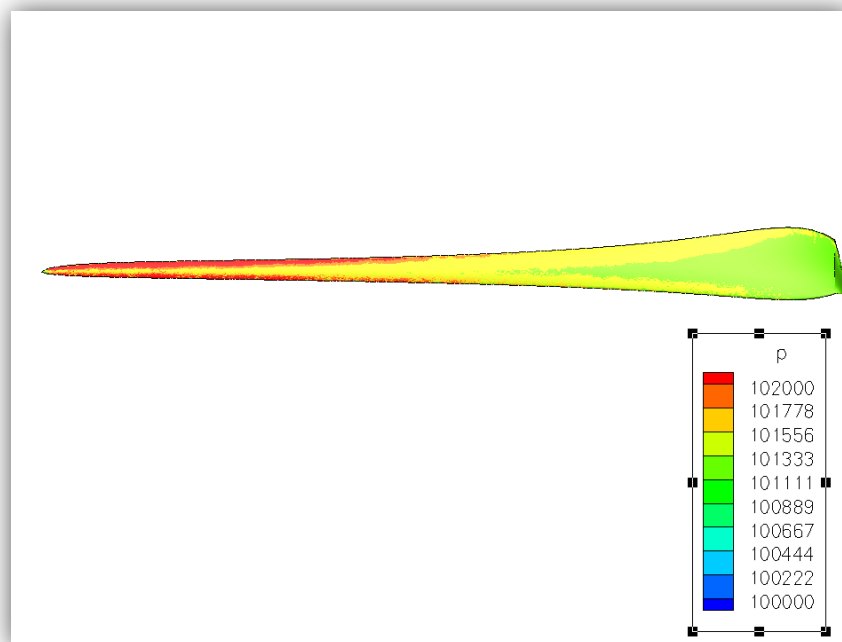


Imagen 3.9. Captura de Tecplot donde se observa mejoría en la punta de pala

En este modelo con el tamaño de elemento de 0.05 ya se ve cómo las distribuciones de presiones son semejantes a lo que debería ser, pero se sigue con el problema de que cuanto menor es el tamaño de malla, mejor salen los resultados, y nos encontramos una vez más con la limitación de la potencia de los ordenadores destinados al mallado y posterior cálculo.

4.- Resolución del problema y resultados

- FICHEROS DE ENTRADA PARA LOS CÁLCULOS

Una vez terminado el proceso de mallado del programa GID, para obtener el problema para calcular, lo que se va a emplear desde el programa GID es la opción de exportar archivo de cálculo, que genera un archivo que contiene todos los datos sobre geometría y condiciones de contorno que hemos impuesto a la malla, con todos los datos de los nodos, la conectividad de los elementos, y el resto de datos que vamos a necesitar.

Este archivo de cálculo es el principal fichero de entrada para el programa Ensa, que es la aplicación encargada de resolver el problema.

El programa Ensa resuelve las ecuaciones de Euler en el fluido de trabajo, que en nuestro caso se trata del aire “alrededor” del rotor del aerogenerador. Las ecuaciones de Euler describen el movimiento de un fluido compresible y no viscoso. De manera que la velocidad en la superficie de contorno no es cero, sino que es la velocidad del aire en ese punto.

Otra opción sería aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes modelando la turbulencia, pero el “gasto” computacional necesario es muy elevado y por tanto no es viable en nuestro caso.

Las ecuaciones de Euler nos ofrecen soluciones aceptables mientras el ángulo de ataque no provoque el desprendido de la capa límite, y aparezcan turbulencias alrededor de la pala.

En nuestro caso se trabaja con un rotor en el punto de diseño así pues, no sucederá el fenómeno del desprendimiento y podemos emplear las ecuaciones de Euler como un buen método de cálculo.

ECUACIONES DE EULER

- Ecuación de continuidad.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta \rho u_i}{\delta x_i} = 0 \quad (4.1)$$

- Ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\delta \rho u_i}{\delta t} + \frac{\delta \rho u_i u_j}{\delta x_j} = -\frac{\delta P}{\delta x_i} + \rho f_{mi} \quad (4.2)$$

- Ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\delta \rho e_{tot}}{\delta t} + \frac{\delta \rho e_{tot} u_i}{\delta x_i} = -\frac{\delta P u_i}{\delta x_i} + \rho f_{mi} u_i \quad (4.3)$$

$$e_{tot} = \frac{1}{2} \vec{u} \cdot \vec{u} + e \quad (4.4)$$

Para proceder al cálculo con el programa Ensa primero hay que comenzar con un fichero de datos “geom.dat” que será ese archivo de cálculo de GID, que contiene todos los datos del mallado, conectividad y el resto de datos necesarios para calcular el problema. Y por otro lado un archivo “input.dat” donde se definen las distintas opciones que ofrece Ensa, como el paso temporal entre los distintos cálculos o por ejemplo si se resuelve mediante un método explícito o implícito.

A la hora de comenzar el cálculo existe un inconveniente que queda por resolver previamente a la resolución del problema y es que en el programa GID en el tipo de problema empleado, las condiciones iniciales de volumen no disponía de una opción para definir la condición de rotación en el volumen.

Por los resultados obtenidos en las primeras simulaciones, se vio que a la hora de resolver el problema partiendo de una velocidad de rotación igual a cero, era un cambio muy brusco pasar de la condición de giro en la entrada, un valor de velocidad angular igual a cero en la proximidad a la entrada. Y por tanto eso hacía fallar las primeras simulaciones.

Para solucionar este problema, contamos con otra de las opciones del programa Ensa, y es que el programa permite arrancar los cálculos a partir de un resultado anterior proveniente del mismo problema. Y esta opción es la que se empleó para poder añadir la condición inicial de rotación en el volumen al modelo.

Lo que se diseñó para corregir ese problema de la condición inicial, fue introducir el estado inicial como el resultado de partida del problema, copiando el formato de los “output” del programa Ensa, de modo que añadiésemos las velocidades en dirección X e Y en cada nodo, provenientes de la rotación del volumen. De esta manera ya se incluye unos valores de rotación en todos los nodos, similares a los resultados esperados tras los cálculos.

Debido a que este proceso es muy laborioso y hay que realizarlo para cada modelo, se realizó una aplicación generada en Fortran 90 de modo que empleando los archivos de geometría “geom.dat”, el programa genere con esos datos de entrada, un archivo de datos siguiendo el formato adecuado, añadiendo la rotación en los valores de velocidad en X e Y.

Por tanto, finalmente cada modelo a resolver tiene tres archivos de entrada, uno donde se encuentran los datos de geometría y de condiciones de contorno, “geom.dat”, otro con las opciones del programa Ensa, “input.dat”, y por último este archivo con los resultados que se utiliza para añadir la condición inicial de rotación en los nodos para comenzar la resolución del problema.

- COMIENZO DE LAS SIMULACIONES

A la hora de hablar de todos los cálculos realizados hay que mencionar que el número de nodos el problema a resolver es una cantidad crítica, puesto que el ordenador con el que se contó para los cálculos disponía de una capacidad limitada de memoria disponible, de modo que a medida que los modelos tenían un tamaño de elemento menor, el ordenador cada vez rendía menos.

A la vez que un modelo grande tenía limitaciones de espacio en la memoria, cuando mayor fuera el número de nodos y elementos de un modelo, mayor tiempo de cálculo necesitaba el ordenador para realizar cada resolución del problema, pudiendo superar los dos días de cálculo cuando se le imponían tamaños de elementos muy pequeños en las superficies del rotor.

A la hora de resolver el problema, se puede hacer mediante métodos implícitos o explícitos. En nuestro caso el método implícito ofrecería una mejor solución puesto que permite trabajar con un mayor CFL (variable relacionada con los pasos temporales), obteniendo en teoría una mayor convergencia, pero con el ordenador que se disponía no se alcanzaban los requisitos necesarios de memoria para las simulaciones, por tanto es una vía de mejora a la cual no se puede acceder debido a las restricciones de memoria.

Por tanto, el problema se resolvió mediante métodos explícitos, con un CFL de "0.4". Hay que comentar que mientras el programa Ensa realiza los cálculos, nos va mostrando a cada paso un valor que indica la magnitud del residuo máximo que existe en el nodo que "peor" se comporta, y al tener que realizar el método explícito no se alcanzaron los valores deseados, pero sin embargo los valores del residuo en los modelos calculados son aceptables y la solución es una solución aproximada.

Una vez acabado el cálculo tenemos dos archivos de salida, el primero se trata del fichero de datos que contiene los resultados de todos los nodos "output.dat" el cual se emplea entre otras cosas para visualizar en Tecplot. Y el segundo es un archivo que contiene los datos de los nodos pertenecientes a unas determinadas superficies que previamente se seleccionan y que conforman

toda la superficie del rotor, “flux output”. Este archivo es necesario para poder calcular los coeficientes adimensionales correspondientes al rotor.

A este archivo de salida de Ensa, “output.dat”, hay que realizarle un postproceso para convertirlo en un archivo que se pueda importar desde Tecplot, y para eso hay una aplicación también creada por previamente, y que sirve para realizar esa tarea.

En el programa Tecplot, se importará el archivo de salida modificado, con la opción “leer archivo de datos” y se importará desde “Tecplot Data Loader”, de modo que mostrará por pantalla el modelo tridimensional del problema.

El hecho de utilizar Tecplot se debe a que se trata de una herramienta sencilla, que nos permite visualizar fácilmente los datos de presión, temperatura, densidad, etc. a lo largo de las superficies y poder percibir de un solo vistazo las posibles anomalías de la solución.

Para el proceso iterativo llevado a cabo hasta alcanzar una solución aceptable se emplearon las tres herramientas que se han ido comentando:

- Generar distintas mallas en GID.
- Crear los distintos archivos de entrada.
- Calcular con Ensa.
- Visualizar resultados con Tecplot, y comparar con resultados de otras simulaciones, para ver mejorías o diferencias.

Y una vez se consiguen unos resultados que analizados con Tecplot se consideran adecuados, tal y como se observaron los distintos modelos de los cuales se pueden ver imágenes en el punto 2, se procede a calcular los distintos coeficientes aerodinámicos correspondientes al rotor.

- CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES

Los aerogeneradores se mueven por dos procedimientos: el arrastre, en el que el viento empuja las palas, y la elevación, en la que las palas se mueven de forma similar a las alas de un avión a través de una corriente de aire.

Por tanto no sólo trabajan con el empuje del viento, sino en combinación con la fuerza de sustentación. En este caso el rotor ha sido diseñado de forma “ideal” de modo que se buscaron las combinaciones de ángulos para sacarle el máximo partido a la combinación de las fuerzas del viento.

El primer cálculo que se plantea realizar es el del coeficiente de sustentación “lift” y el coeficiente de resistencia “drag” de una sección cualquiera. En la siguiente imagen 4.1 se describen las distintas fuerzas referidas a una sección de pala de un rotor.

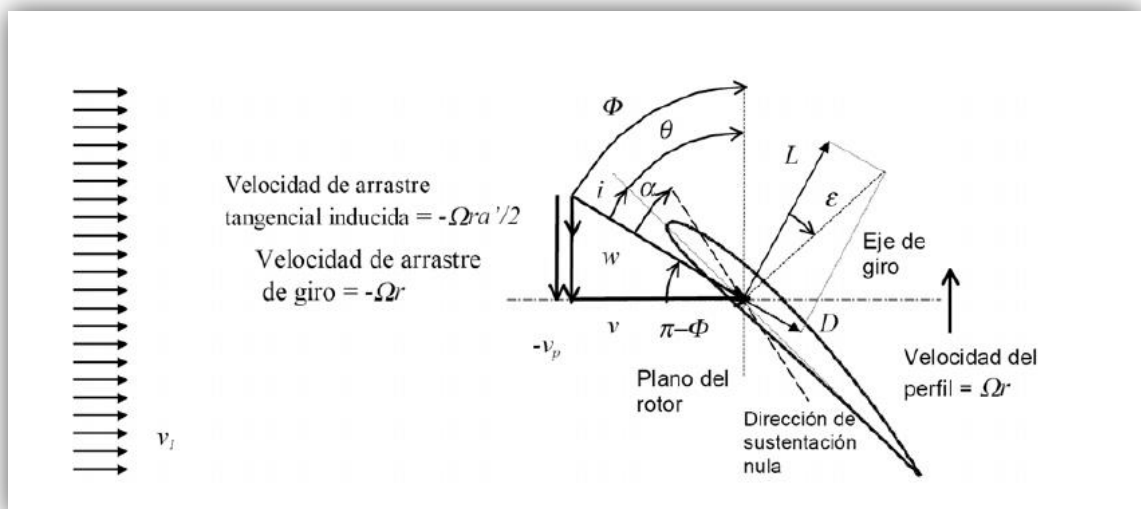


Imagen 4.1. Triángulo de velocidades en una sección de pala

Y los coeficientes de “lift” y “drag” para una sección de pala se calculan mediante las siguientes ecuaciones 4.5 y 4.6:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \quad (4.5)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \quad (4.6)$$

ρ : Densidad del aire

U : Velocidad relativa del aire

c : Cuerda del perfil naca

Una de las cosas que se observa es que la fuerza Lift está en la dirección perpendicular a la velocidad relativa del viento y por tanto habrá que realizar un cambio de ejes una vez calculadas las distintas fuerzas en la sección del rotor. La velocidad relativa se compone de la componente axial de la velocidad del viento (v_1), y la componente de velocidad producida por el giro ($-\Omega \cdot r$).

Como ambos datos son fijos obtendremos fácilmente los ángulos que se observaban en la figura 4.1. La velocidad de giro es uno de los datos de partida y la velocidad del viento se trata de un valor habitual en un aerogenerador. Además, el ángulo de inclinación del perfil θ hay que recordar que era un dato a partir del cual se creó la geometría del rotor, así pues ya es conocido.

Para realizar este cálculo de nuevo se acudió a la programación Fortran para calcular las fuerzas resultantes en la sección de la pala. La misión de esta aplicación era la de calcular las fuerzas entre nodos, con la normal en cada nodo, de modo que haciendo el sumatorio de las fuerzas en cada superficie se obtuviera una fuerza global que luego se trasladase al eje de velocidad relativa del viento, obteniendo la fuerza L y la fuerza D. El concepto se entiende fácilmente en la imagen 4.2

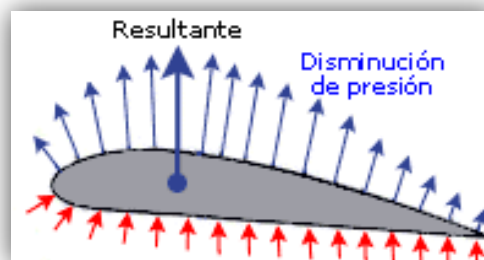


Imagen 4.2. Fuerzas a lo largo de una sección

Otros coeficientes que se plantean calcular son los coeficientes de potencia, de par, y de fuerza axial. Que se calculan según las formulas 4.7, 4.8, 4.9.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v^3(\pi R^2)} \quad (4.7)$$

$$C_T = \frac{F_{axial}}{\frac{1}{2}\rho v^2(\pi R^2)} \quad (4.8)$$

$$C_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho v^2(\pi R^2)R} \quad (4.9)$$

ρ : Densidad del aire

v : Velocidad del aire

R : Radio de las palas del rotor

P : Potencia aprovechada por el rotor

Q : Par generado en el rotor

F_{axial} : Componente axial de las fuerzas generadas en el rotor

En todas ellas el término del dividendo se trata de la cantidad que es aprovechada por el rotor del aerogenerador, y el divisor contempla el valor teórico disponible en el viento. Sin olvidar que entre otras limitaciones, el coeficiente de potencia está limitado por el límite de Betz que estima el valor máximo y que se puede alcanzar en 0.5926. Y que los valores del coeficiente de potencia en un aerogenerador real pueden llegar a valores de 0.45.

Existe una particularidad en estos coeficientes y es que están influenciados por la velocidad del aire, cuyo dato se eligió a partir de las velocidades medias de funcionamiento de un aerogenerador habitual.

En estas simulaciones, el rotor se trata de un modelo teórico, diseñado para maximizar los valores de estos coeficientes, y que por tanto no sigue los patrones de diseño de un rotor real, puesto que no se ha modificado el perfil ideal para añadir resistencia a la pala y así poder resistir las elevadas cargas que debe soportar, por consiguiente los valores que se obtengan estarán siempre condicionados por esta idealización de la pala del rotor.

A continuación se muestra en unas gráficas los valores teóricos de los coeficientes lift y drag para el perfil NACA 63 212 que es el empleado en nuestro modelo de rotor.

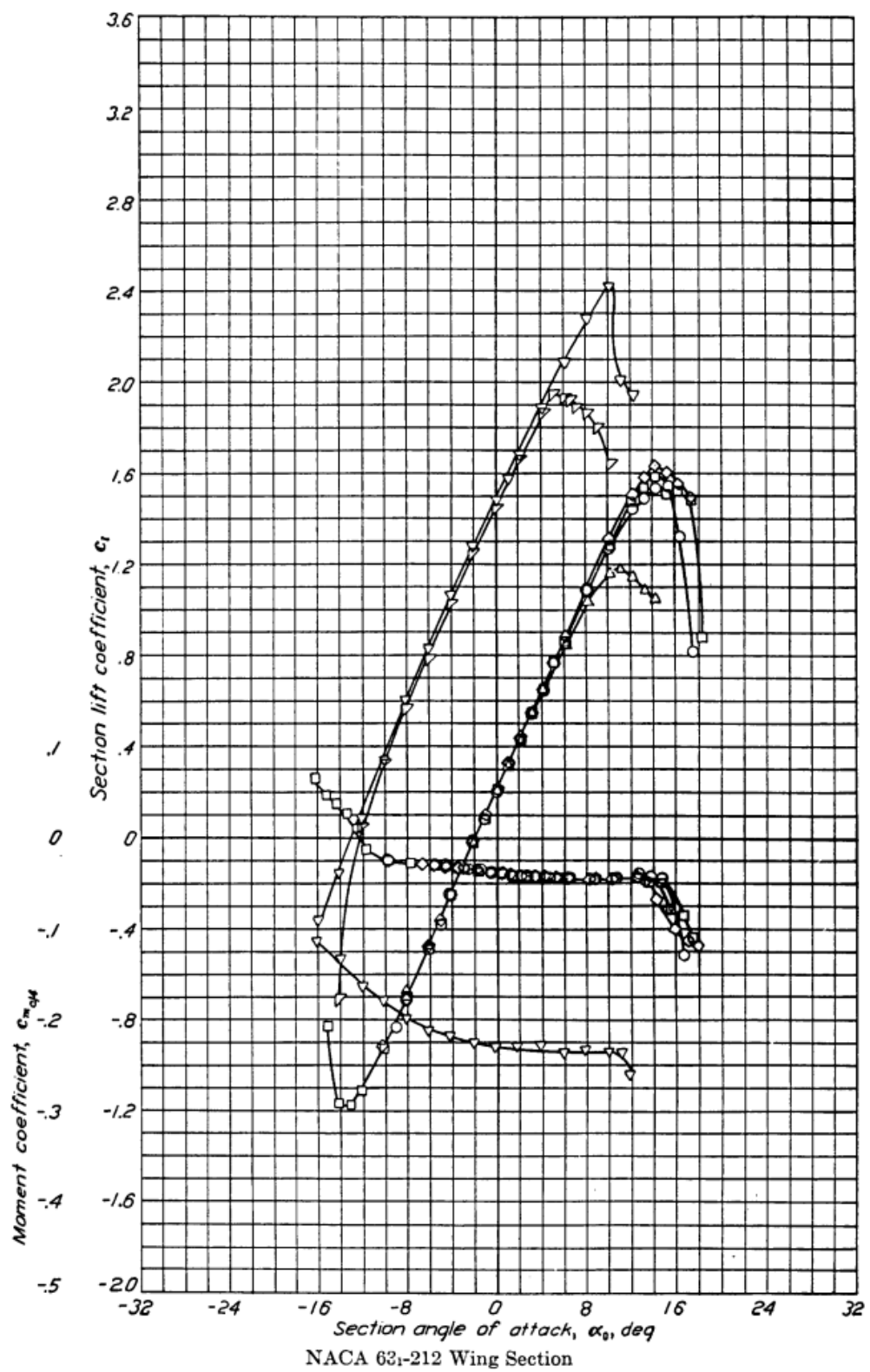


Imagen 4.3. Coeficientes lift para el perfil naca 63212 según el ángulo de ataque

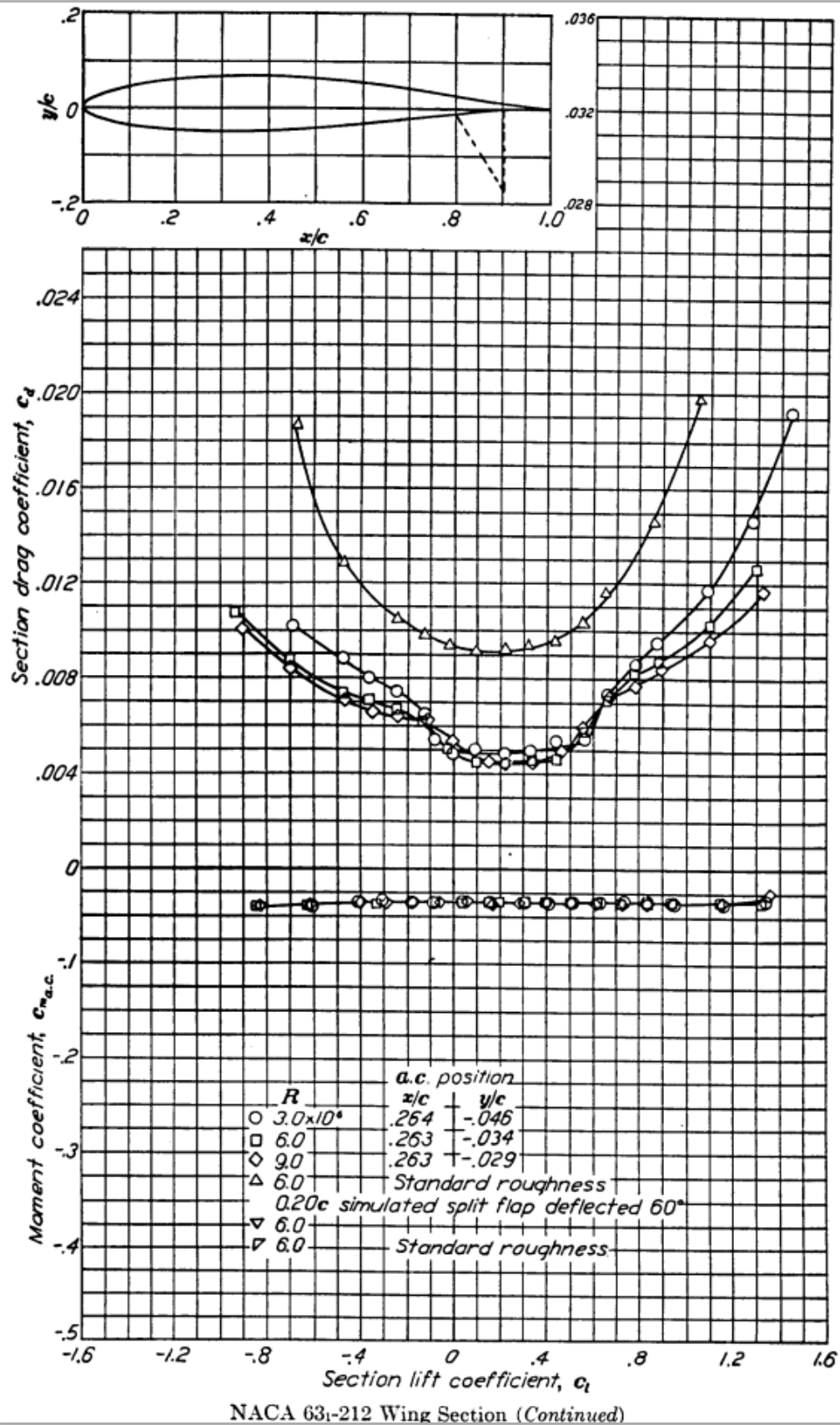


Imagen 4.4. Coeficientes drag para el perfil naca 63212 según el coeficiente de lift

Para calcular dichos coeficientes se creó una aplicación programada en lenguaje Fortran 90, de modo que a partir de dos ficheros provenientes de las simulaciones, “geom.dat” y “flux output” del programa Ensa, se calculasen los distintos coeficientes de dichos modelos. A continuación se explicará de forma breve la metodología empleada para calcular dichos coeficientes.

Por un lado se tienen los datos de presión y coordenadas en cada uno de los nodos de todo el volumen, y por otro lado están los datos de los nodos que pertenecen a la superficie del rotor, tal y cómo los obtenemos mediante el “flux output”.

El primer paso es distinguir entre los elementos que forman parte de las superficies de las palas, y el resto de elementos del volumen, de modo que podamos trabajar con esos elementos solamente.

Con esos elementos se trabajará cada uno individualmente para obtener los siguientes datos:

- Obtener la cara del tetraedro que forma parte del rotor.
- En esta cara calcular las coordenadas del punto medio (para calcular el par).
- Calcular la presión media en ese punto medio con los 3 nodos.
- Obtener dos vectores directores entre los nodos, de modo que se pueda calcular la normal de la superficie realizando el producto vectorial, y a su vez calcular la superficie encerrada entre los tres nodos, definida por el módulo del producto vectorial de ambos vectores, dividido entre dos.

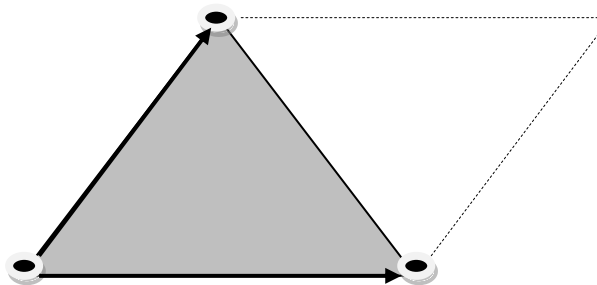


Imagen 4.5. Vectores en las superficies triangulares del contorno

- Hay que comprobar si la normal que se ha calculado en la superficie, es “entrante” o “saliente”. Para ello se calcula el vector director entre uno de los tres nodos y el cuarto que no se ha utilizado hasta ahora, y se compara el sentido con el vector normal de la superficie realizando el producto escalar entre ambos y viendo si el resultado es positivo (mismo sentido) o negativo (distinto sentido), y en el caso de que sean distinto se le cambia el sentido al vector normal, de modo que todas las normales sean “salientes”
- Normalizar el vector normal, dividiendo las componentes por el módulo.
- Calcular la potencia generada por cada una de estas superficies

$$P = \vec{Q} \cdot \vec{\omega} \quad (4.6)$$

P: Potencia

\vec{Q} : Par

$\vec{\omega}$: Velocidad angular

$$P = (\vec{r} \times \vec{F}) \cdot \vec{\omega} \quad (4.7)$$

\vec{r}_Δ : Coordenadas del punto medio

P_Δ : Presión media en la superficie

$$P = (\vec{r}_\Delta \times P_\Delta \vec{n}_\Delta) \cdot \vec{\omega} \quad (4.8)$$

\vec{n}_Δ : Vector normal de la superficie

- Finalmente se calcula el sumatorio de todas las aportaciones de cada una de las superficies, de modo que se obtengan los dividendos de los distintos coeficientes anteriormente mencionados. Y los divisores se calcularán a partir de los datos que se han impuesto en nuestro problema.

- RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES

Hay que explicar en primer lugar que existe un conflicto entre las necesidades de la simulación para obtener resultados y la precisión de las mallas del programa Ensa.

Se ha ido observando que según se reducía el tamaño de malla, los elementos que se van generando, crean una superficie global “rugosa”, de forma que lo que se esperaba en un primer momento eran elementos que formasen la superficie de forma aproximada sin ese tipo de rugosidad.

Este tipo de rugosidad en superficies tan grandes es difícil de observar puesto que los tamaños de elementos son de varios órdenes de magnitud menores, pero sigue los patrones de la siguiente imagen:

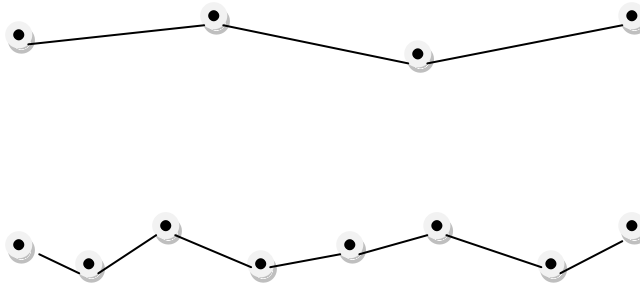


Imagen 4.6. Explicación de las superficies generadas con distintos tamaños de elementos

Tal y como se intenta mostrar en la imagen 4.6, existe una problemática, a medida que reduces el tamaño de los elementos, aunque el valor de las desviaciones sea el mismo, las inclinaciones que se generan en las superficies son mucho peores en el caso de reducir el tamaño del elemento.

He aquí el conflicto del cual se está hablando, por un lado tamaños de elementos “grandes” nos proporcionan soluciones no tan precisas como debería, tal y como se observa en las capturas de Tecplot. Sin embargo el reducir el tamaño de los elementos produce el fenómeno de las “superficies rugosas” con lo cual las soluciones no acaban siendo las esperadas.

El principal inconveniente de estas “superficies rugosas” es la aparición de una serie de elementos que contienen sus cuatro nodos en la superficie. Dichos elementos además de poder ser conflictivos en cuanto al cálculo interno de Ensa, significan zonas sin resultados en el sumatorio de la aportación de potencia de cada elemento para el coeficiente de potencia. Por tanto este tipo de elementos estropean todas las simulaciones por lo cual no se pueden obtener resultados precisos.

Un elemento como el que se comenta se remarca en la imagen 4.7, donde aunque no se pueda identificar muy bien debido a la densidad de la malla, se puede ver que recorre una zona importante:

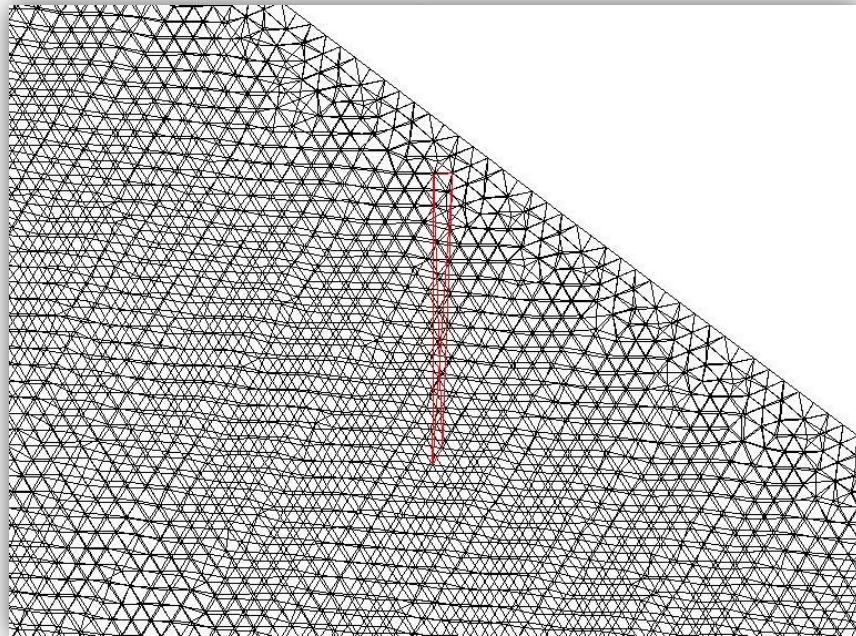
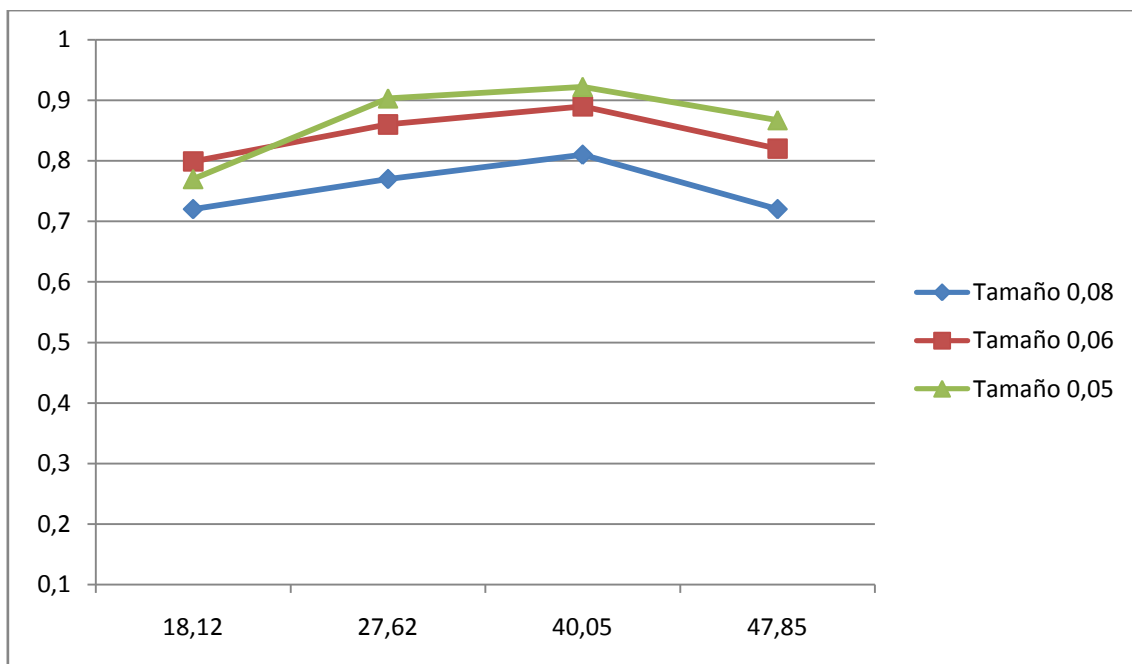


Imagen 4.7. Elemento con cuatro de sus nodos en el contorno

→ Coeficiente de Lift

El coeficiente de Lift es un coeficiente que calculamos en dos dimensiones, por tanto el efecto de esos elementos extraños con cuatro nodos en el contorno no es tan apreciable en su cálculo.

Los Resultados obtenidos en las simulaciones son los siguientes.



Se comprueba que a medida que el tamaño máximo del elemento se reduce, el valor del coeficiente en las secciones principales sube. Sin embargo el valor teórico del coeficiente según las tablas y para el ángulo de ataque se que ha diseñado para cada sección, es un valor de 1.2.

Con lo cual estamos teniendo una desviación en torno al 30% del coeficiente que deberíamos obtener. Lo cual indica que existía un problema en las simulaciones, debido a los errores de la malla.

5.- Conclusiones y Opciones de mejora

En este proyecto se ha abordado el tema de generar un rotor de aerogenerador a partir de unos datos de entrada, para ello se trabajó con varios programas y se introdujo en el manejo de dichos programas para poder obtener lo deseado en cada uno de los casos.

Tanto el programa GID como el programa QBlade se comenzaron a emplear sin experiencia previa y en el caso particular de GID hubo que indagar en la forma de introducir comandos para poder realizar un proceso “automático” en la generación de distintos modelos de rotores. Creando distintos archivos de comandos, analizándolos posteriormente para encontrar las órdenes y los parámetros necesarios.

En los anexos de esta memoria se explica de forma algo más concreta cómo se obtienen esos comandos y se exponen varios de los comandos empleados.

Otra de las áreas importantes de trabajo en este proyecto ha sido la creación de una serie de aplicaciones Fortran, programadas en lenguaje Fortran 90. Con este lenguaje de programación se trabajó especialmente por la facilidad de compilación y ejecución en entorno Linux, que es el sistema operativo con el que se trabajó.

Estas aplicaciones han sido desde crear ficheros de comandos para dibujar la geometría en el programa GID, pasando por editar los propios ficheros que se emplean para iniciar Ensa para añadir determinadas condiciones de contorno e incluso programas para tratar los resultados, de modo a partir de los resultados obtenidos en Ensa se fueran calculando los coeficientes necesarios para analizar los resultados.

Además los programas realizados en Fortran han sido comprobados para ver que realizaban correctamente su función, calculando de forma manual lo mismo que se obtenga de los programas y comparando para ver que sea lo mismo.

La conclusión de todo el trabajo previo al cálculo del Ensa es que se ha realizado con éxito un método para reproducir distintos rotores de aerogenerador y se han desarrollado herramientas para el análisis de los resultados de las simulaciones con dichos modelos.

Si bien es cierto que el mallado con el programa GID ha resultado problemático, obteniendo una serie de elementos con cuatro nodos en el contorno, incluso con una opción activada destinada a evitar la aparición de los mismos. Hay que explicar que me puse en contacto con una persona con mayores conocimientos en el funcionamiento del mallado del programa GID, y tras intentar solucionar dicho problema con los consejos de esta persona, no se obtuvo ninguna mejora en este aspecto.

Por tanto aunque los resultados de coeficientes aerodinámicos no sean concluyentes, este proyecto sienta las bases para futuros trabajos relacionados con el tema expuesto durante toda la memoria. Además existen ciertas áreas de mejora en las cuales se puede seguir trabajando para intentar obtener mejores resultados.

Opciones de mejora

Las opciones de mejora son una parte importante de las conclusiones de este proyecto, puesto que a la vista de los determinados problemas encontrados a la hora de realizar el trabajo previsto, es reseñable que el tema no acaba en lo que se ha trabajado, sino que siguen existiendo áreas de trabajo y distintas posibilidades de enfocar el problema.

En este ámbito hay varias opciones que se barajaron a la hora de realizar el proyecto, y que no se pudieron llevar a cabo por distintos motivos pero en las cuales se trabajó y son posibles áreas de trabajo para obtener mejores resultados.

- **NO EMPLEAR LÍNEAS NURBS**

Si recordamos, a la hora de dibujar el perfil aerodinámico en GID, se empleaba una línea nurbs, creada a partir de la definición de los distintos puntos del perfil, dicha línea creaba de manera muy exacta las curvas del perfil, de modo que el perfil se aproximaba muy acertadamente al perfil real.

El inconveniente de este método es que sólo se daban como puntos fijos dos puntos en ambos lados del perfil, tal y como se observa en la imagen 5.3. Y luego a la hora de aproximar la curva del perfil durante el proceso de mallado, el programa “intenta” acercarse a esos puntos.

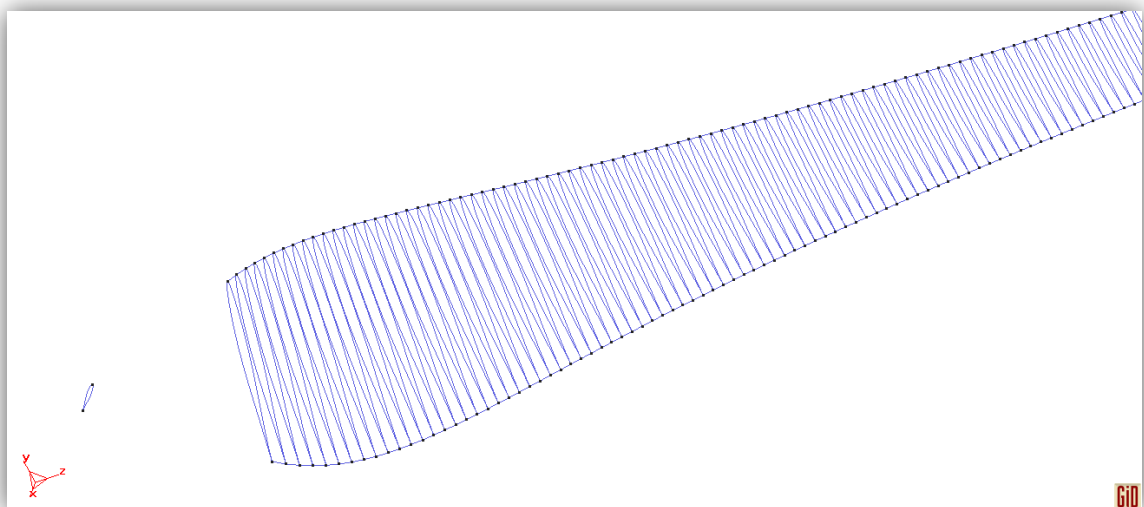


Imagen 5.3. Perfiles NACA 63 212 con dos puntos característicos.

La idea es que si ya disponemos de los datos de los puntos reales del perfil, sería mucho más útil crear directamente los perfiles como líneas que forman la geometría, puesto que aunque sea una curva la superficie nurbs, finalmente acabará aproximándola por líneas rectas.

Por tanto debería ser mucho mejor trabajar directamente con los puntos reales de la geometría del perfil, y no con los que el programa GID “intenta” aproximar posteriormente al realizar el mallado.

Esta solución no es que no se haya intentado, pero a la hora de crear cada uno de los perfiles se necesitaban 100 líneas sólo para definir el perfil NACA 63 212. Además dichas líneas son de un tamaño muy reducido, con lo cual el tamaño de los elementos se veía muy limitado, y como ya se comentó varias veces a lo largo de esta memoria, no se disponía de la suficiente potencia computacional para resolver el problema del mallado de dicho modelo.

Se pueden ver los perfiles en las imágenes 5.4 y 5.5



Imagen 5.4. Puntos que definen el perfil NACA 63 212

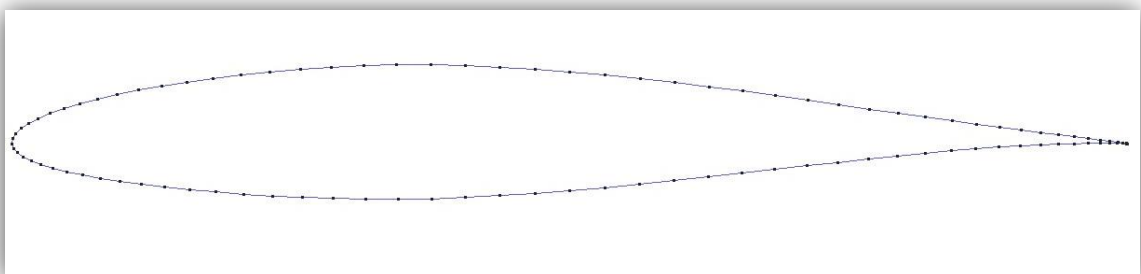


Imagen 5.3. Perfil NACA 63 212 generado a partir de líneas rectas

- **EMPLEAR LA SIMETRÍA**

Este concepto es muy simple, puesto que el rotor tiene simetría cada 120° , el problema se puede reducir a un solo tercio de dicho volumen, y extrapolar los resultados.

Esta opción se trató especialmente puesto que uno de los principales escollos encontrados a la hora de realizar los distintos modelos y simulaciones eran las limitaciones computacionales que existían, por lo cual reducir el tamaño del problema entre tres era un objetivo prioritario.

Para ello se realizaron modificaciones a los programas Fortran, de modo que se obtuvieran modelos con los que se trabajase con una sola pala del rotor, y trabajando con un tercio del cilindro de aire alrededor. Con lo cual se esperaba una reducción similar en el número de nodos y de elementos. Tal y como se observa en las imágenes 5.1 y 5.2.

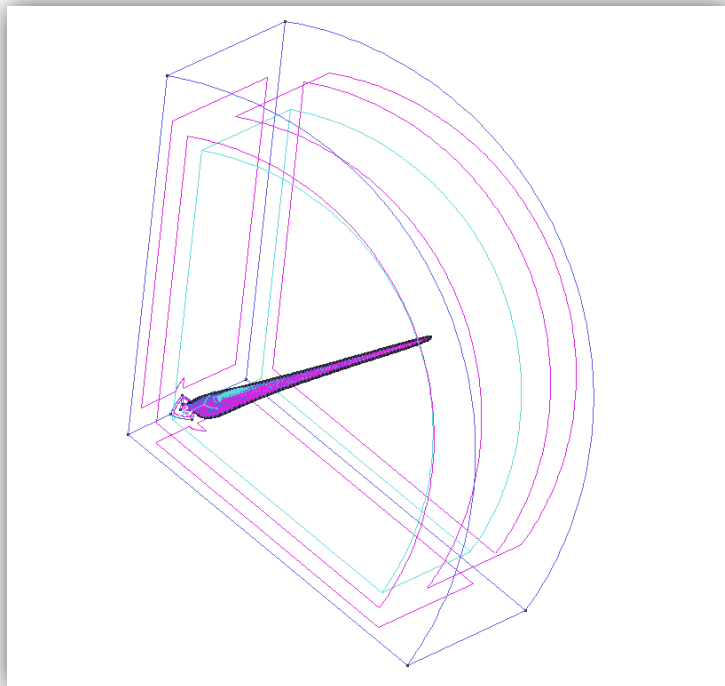


Imagen 5.1. Geometría de una pala con un tercio del volumen

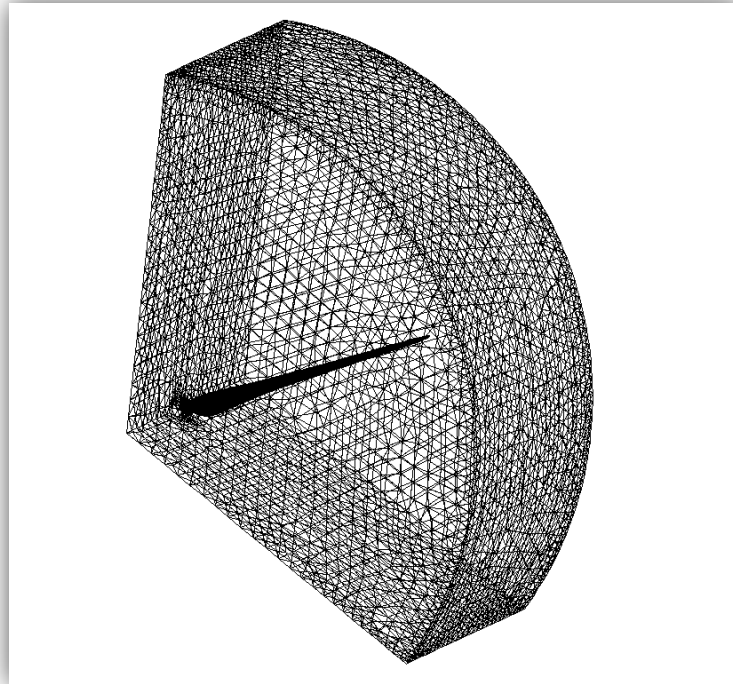


Imagen 5.2. Geometría del mallado de una pala con un tercio del volumen

El principal motivo por el cual se acabó descartando este modelo con el cual se trabajaba con un tercio del volumen del problema fue la imposibilidad de imponer las condiciones de contorno correctamente puesto que aun no estaban disponibles las herramientas necesarias para ello.

Sin embargo supone una importante área de mejora puesto que si se trabajase con un volumen menor, el tamaño de malla se podría reducir sin tener que aumentar el tamaño del problema en grandes cantidades. Además de reducir tiempo de computación y un mejor aprovechamiento de la memoria.

- **EMPLEAR EL MÉTODO DEL MALLADO ADAPTATIVO**

Entre los objetivos del proyecto se encontraba el de realizar un mallado adaptativo al problema una vez encontrado un modelo suficientemente estable para realizar dicho proceso.

El mallado adaptativo es un tipo de herramienta diseñada por el departamento y cuya misión es realizar un tipo de mallado en función de los resultados obtenidos, realizando una malla con tamaños de elementos distintos dependiendo de las necesidades de cada zona.

Los elementos empleados en las áreas cercanas a los nodos donde el resultado obtenido tiene una peor convergencia tendrán un tamaño menor, es decir, allá donde el residuo sea mayor. De este modo se realiza un mallado concreto donde más se necesite, sin tener que mallar zonas innecesarias a causa de las que sí necesitan un mayor detalle.

El estimador de error ofrece una medida del error en cada elemento, calculada a partir del residuo obtenido en una resolución anterior del problema.

La principal motivación para querer emplear este mallado adaptativo es que empleándolo se alcanzan mejores resultados, pero también va relacionado con reducir el tamaño del problema, puesto que la idea es no desperdiciar recursos en zonas innecesarias.

Una peculiaridad de este método es que el tamaño del mallado que “debes” realizar depende de las magnitudes de los errores. Puesto que en las soluciones que se plantean en este proyecto esos residuos eran algo elevados debido a una baja convergencia, el mallado propuesto por este método quedaba fuera del alcance de los ordenadores disponibles.

Debido a esto no se pudo realizar el método del mallado adaptativo a los modelos existentes, pero es otra importante área de mejora puesto que a la vez que economiza el uso de recursos, conlleva obtener mejores soluciones, puesto que concentra las mallas donde se necesite, de modo que no haya errores debidos a un tamaño de malla insuficiente como se observaban en los modelos explicados en el punto 3.

BIBLIOGRAFÍA

1. J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers. "Wind Energy Explained. Theory, Design and Application". Ed WILEY. 2002.
2. Ira H.Abbott, Albert E.Von Doenhoff. "Theory of Wing Sections" (Tablas de los perfiles NACA 63 212).
3. Y. Bazilevs, M. -C.Hsu, I. Akkerman, S. Wright, K. Takizawa, B. Henicke, T. Spielman, T. E. Tezduyar. "3D simulation of wind turbine rotors at full scale". Wiley Online Library 25 agosto 2010.
4. Tanja van Mourik. "Fortran 90/95 Programming Manual". 2005
5. "Fortran 90 User's Guide". Sunsoft 1995
6. "GID Reference Manual". 2012
7. "GID User Manual". 2012
8. Jesús Gil. "La consola en GNU / Linux"

Anexo I: Comandos del programa GID

En este anexo se va a documentar la mayor parte de las ordenes que se han utilizado para crear la geometría en los “bach files” o archivos de comandos, hay que reseñar que son de la versión 10.0.9, y que se ha comprobado que en la versión 11.0.1 no funcionan de la misma manera, aunque son muy parecidos.

La forma de obtener estos comandos ha sido la siguiente, primero activar la opción de que todo lo que hagamos se registre en un archivo “bach file”, al cual acceder luego y encontrar los comandos.

Así pues el primer paso será activar esa opción. La encontraremos en el menú “Utilidades” y allí seleccionamos preferencias. Se abrirá una pantalla como la que se muestra en la imagen A1.1

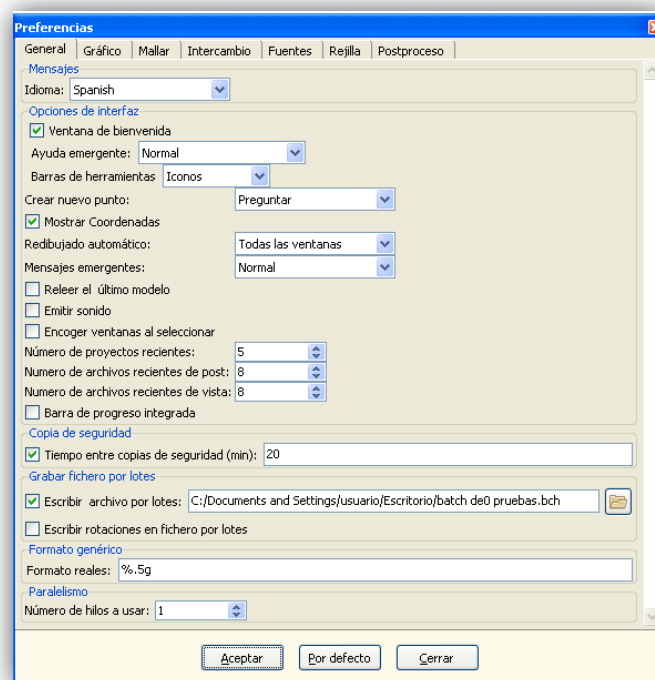


Imagen A1.1 Captura de pantalla del menú de preferencias de GID

En la pestaña “General” encontramos al final del todo la opción “Escribir archivo por lotes”, y es esa la que se debe activar, seleccionando la carpeta donde queremos que se vaya guardando el archivo.

Luego, lo que se realizó fueron las operaciones que se creían necesarias. Todo a mano a través de GID. Una vez hecho esto, acudiendo al “bach file”, se buscó los distintos comandos y la sintaxis que se explica a continuación:

- **Geometry Create NurbsLine** → Este comando crea una línea curva a partir de los datos de los puntos que definen esa línea. Se emplea a la hora de crear el perfil NACA 63 212 a partir de un bloc de notas con las coordenadas X,Y de los puntos que definen el perfil NACA 63 212, y para crear los perfiles intermedios.

- **Geometry Edit DivideLine Multiple point PointInLine** → Esta orden sirve para dividir la línea nurbs creada anteriormente, esto es necesario puesto que GID no trabaja bien con superficies definidas por una línea que empieza y acaba en el mismo punto, por eso es preferible trabajar con dos líneas que dividen el perfil en dos partes. Es necesario definirle un punto cercano a la curva por donde dividirla y luego introducir el número de la línea que vamos a dividir.

- **Utilities Move Lines Duplicate MaintainLayers Scale FNoJoin X,Y,Z FNoJoin X Y Z** → En este caso es una orden compleja donde tenemos muchas variantes; la primera de ellas es elegir entre “Move” o “Copy”, el primero sirve para editar sin duplicar y si elegimos “Copy” realizará una copia a la vez que lo edita. Lo siguiente que hay que definir es si vamos a editar puntos, líneas, volúmenes, o todos los tipos, en este caso está seleccionado “Lines”.

Otra de las cosas que se selecciona es el elegir la operación de que realizamos: traslación, escalado, rotación... etc. En este ejemplo está la opción de escalar (“Scale”). Es importante resaltar que con cada opción el programa nos pide datos distintos, por ejemplo, en nuestro caso de escalado necesitamos definir en primer lugar un punto X Y Z que servirá como centro de referencia de la ampliación, y después definir en “tanto por uno” el factor de ampliación en dirección X Y Z.

Si lo que necesitamos es hacer una rotación, el comando necesario sería como el que se muestra a continuación “Rotation FNoJoin X,Y,Z TwoDim α ”. El punto que determinamos con las coordenadas X Y Z es el centro de giro. Con “TwoDim” se explicita que sea un giro en dos dimensiones X Y, y sin esta

opción lo que tendríamos que definir es un segundo punto de forma que los dos puntos definan el eje de giro. Y por último terminando con el ángulo de rotación α .

- **Geometry Create NurbsSurface** → La orden sirve para crear una superficie tras escribir el comando que introducir los números de las líneas que delimitan esta superficie.

- **Geometry Create Volume** → Similar a la anterior pero en este caso para crear un volumen enumerando las superficies que encierran dicho volumen.

- **Geometry Create Object Cylinder** → Crea un cilindro definiendo el centro, el radio y la altura.

- **Geometry Create Line** → Crea una línea definida por dos puntos. Junto con el comando “Join” podemos seleccionar puntos ya existentes para crear la línea sin duplicar entidades.

Por último, después de cada uno de los comandos hay que poner la orden “escape” para dar por confirmada la operación que le estamos mandando al programa. Y “Mescape” antes de introducir el comienzo de las órdenes que sean de “Geometry”, que viene a ser uno de los menús de la parte superior del programa.

Y a la hora de hacer comentarios de forma que puedan explicar algunos pasos, se debe colocar antes de la frase el signo de exclamación “ ! ”.

Un ejemplo de la sintaxis sería el siguiente:

Mescape	Geometry Create Line	! Crear línea.
Join		! Unir puntos ya existentes.
1	2	! Unir los puntos 1 y 2.
Escape		! Confirmar la operación.

A la hora de realizar la geometría en los “bach files” lo que hay que hacer es ir variando los datos que me piden estos comandos, y aquí es donde ayuda la simplicidad de la programación Fortran 90, que nos sirve para poder ir escribiendo en un “bach file” todo el tiempo los comandos que se requieran e ir variando los valores de los parámetros que definen la operación de edición mediante bucles.

En este anexo se han comentado la mayoría de los comandos que se necesitan para generar la geometría del rotor, pero sin duda existen muchos otros comandos destinados a realizar otras operaciones que no se precisan y que habría que obtener de la misma manera que se obtuvieron estos.

Anexo II: Perfiles intermedios con el programa QBlade

En el siguiente anexo se va a proceder a explicar la metodología de creación de perfiles intermedios en el programa QBlade. La utilidad de este método está limitada por la calidad de los perfiles originales entre los cuales se va a interpolar, por tanto tendremos que intentar importar en el programa QBlade la versión más exacta del perfil que necesitemos para crear el resto de perfiles intermedios.

Lo primero que hay que aclarar sobre el programa QBlade es que tiene muchas más herramientas para la generación de modelos de aerogeneradores, e incluso es capaz de generar modelos de rotores completos y simular ciertos parámetros para obtener datos del comportamiento aerodinámico de las palas, pero en nuestro caso sólo vamos a utilizar la parte en la cual se crean los perfiles de las palas, puesto que vamos a generar la geometría en GID y los cálculos se realizarán en Ensa.

Para comenzar con la creación de perfiles en el programa QBlade, hay que ir a la opción de generar perfiles de forma directa, como se muestra en la imagen A2.1, donde se nos permitirá incluso hacer perfiles de forma manual.

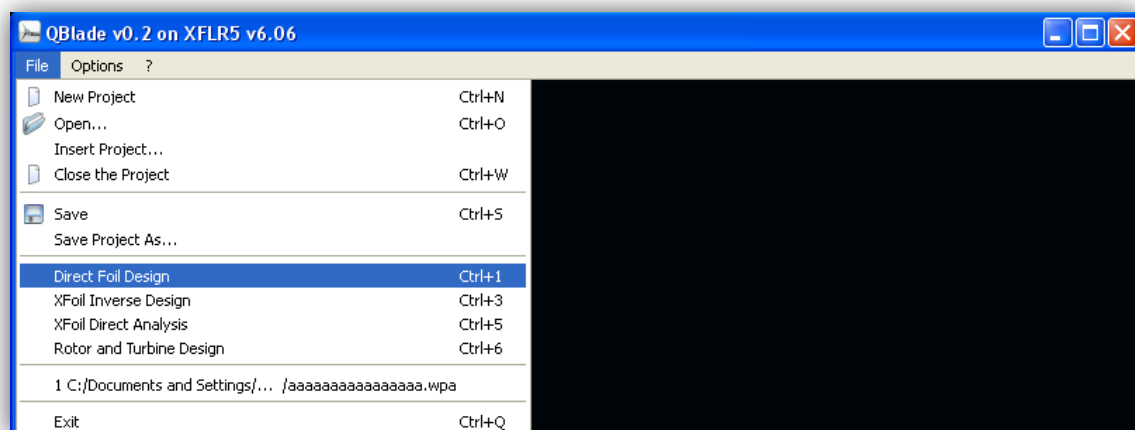


Imagen A2.1. Captura de pantalla del menú de QBlade

Y llegaremos a una pantalla como la que vemos en la imagen A2.2

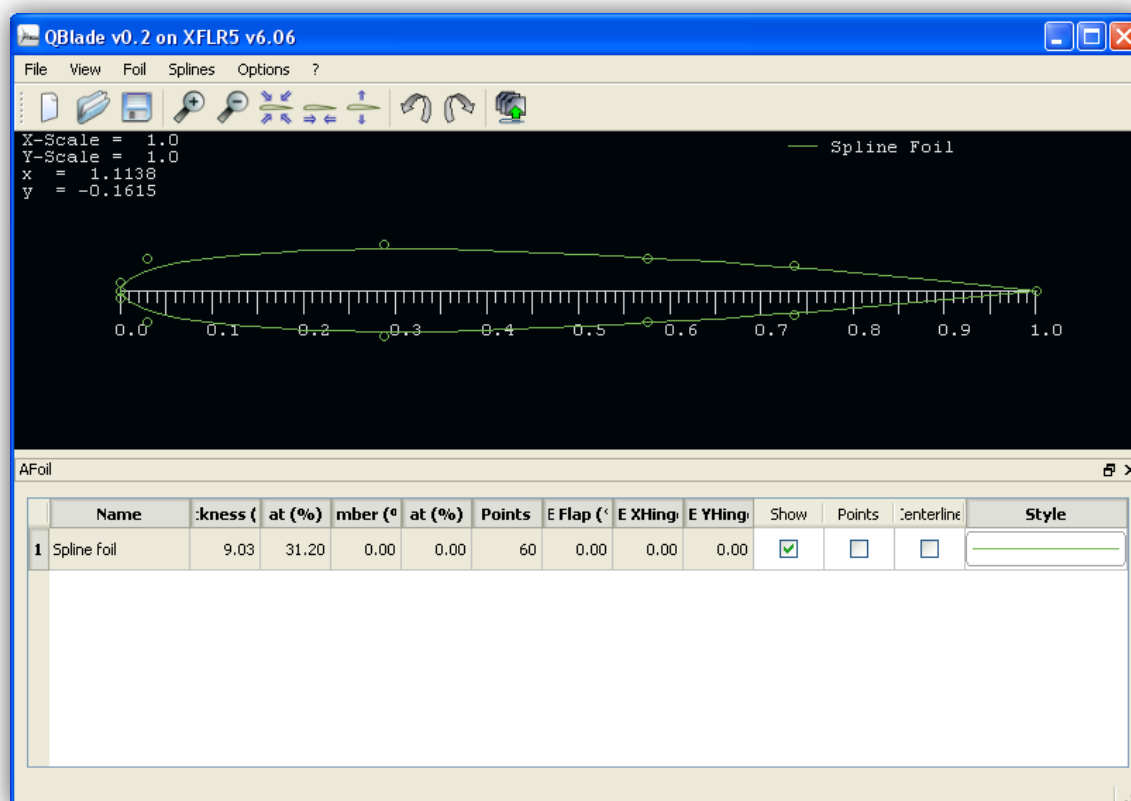


Imagen A2.2. Captura de pantalla del diseño directo de perfiles en QBlade

En este momento ya se podrían crear perfiles a mano, simplemente seleccionando con el ratón los círculos repartidos a lo largo del perfil y arrastrándolos a la posición que deseásemos. El problema de esta forma de crear perfiles es que las distancias son poco precisas al ser algo que se realiza a mano alzada. Pero se podría emplear para generar perfiles y posteriormente analizarlos puesto que el programa permite la exportación de datos, de manera que en un fichero de datos obtendremos los puntos que definen el perfil.

De igual manera que existe la posibilidad de exportar datos, el programa nos permite importar ficheros de datos que contengan los datos de nuestro perfil y poder trabajar con ese. Y es precisamente esta opción la que más nos interesa puesto que partimos de un fichero de datos con las coordenadas del perfil NACA 63 212 y en este caso vamos a interpolar con una circunferencia, que sería una aproximación a la conexión entre palas y buje.

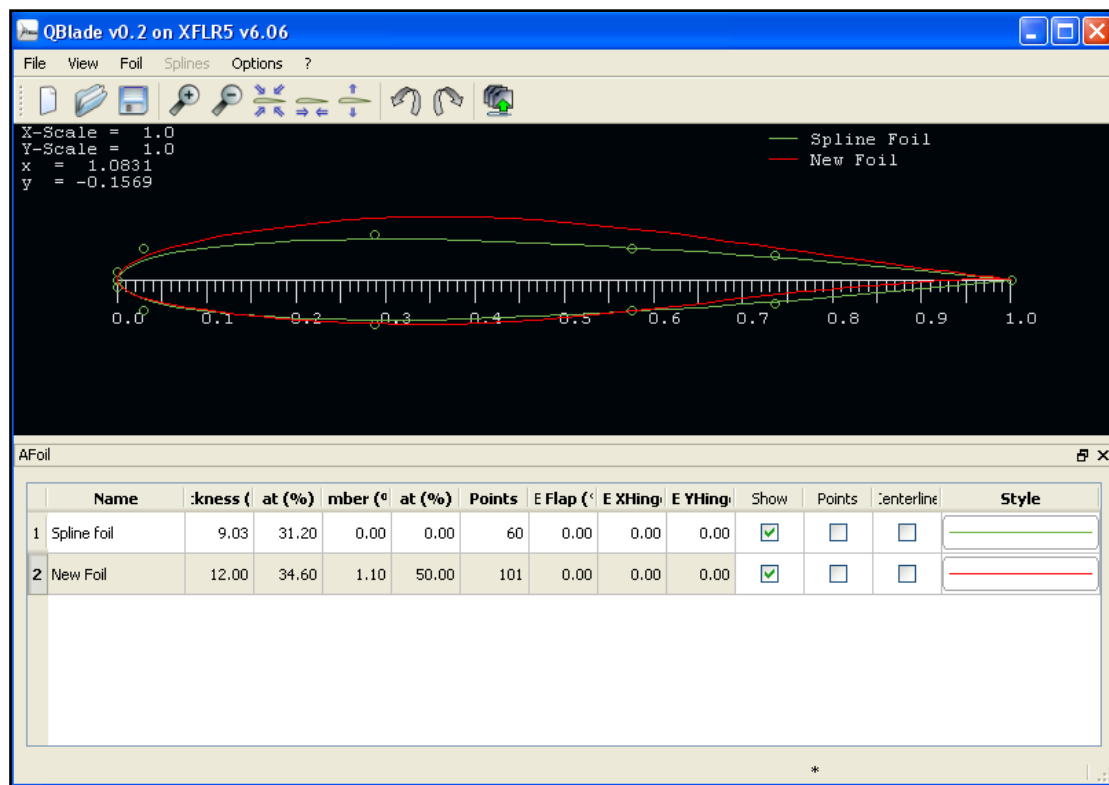


Imagen A2.3. Captura de pantalla del perfil naca 63212 importado en QBlade

En la imagen A2.3 se observa cómo se ha importado el perfil NACA 63 212 simplemente con la opción de abrir un archivo cuyo icono muestra una carpeta abierta. El fichero de entrada tiene la extensión “.dat” y la sintaxis del archivo de entrada de datos es la siguiente: en cada línea debemos escribir las coordenadas (X, Y) de uno de los puntos del perfil hasta completar su geometría. Posteriormente para trabajar mejor podemos desactivar la visualización del perfil por defecto (verde) que era el que se podía modificar manualmente.

Una vez conocida esta opción y habiendo importado el perfil NACA 63212, ya sólo necesitamos una circunferencia con el radio adecuado para crear los perfiles intermedios. En este caso, por simplificar trabajo, se creó un programa Fortran muy simple, que a partir de un valor de la coordenada X de radio resolvía la ecuación de la circunferencia y posteriormente escribía las coordenadas de los puntos X,Y que definen esa circunferencia en un fichero de datos. Con una distancia entre puntos suficientemente pequeña para no perder información, especialmente hay que ser cuidadoso en las zonas de $X=0$ y

X=Diámetro, el incremento de la variable X debe ser pequeño puesto que la curvatura es muy grande en esas zonas

Una vez tenemos los dos perfiles originales, a partir de los cuales se van a crear perfiles intermedios, tenemos que clicar con el botón derecho en un perfil, posteriormente vamos a la opción “Foil Design” y allí seleccionamos “Interpolate Foils”. El menú se muestra en la imagen A2.4

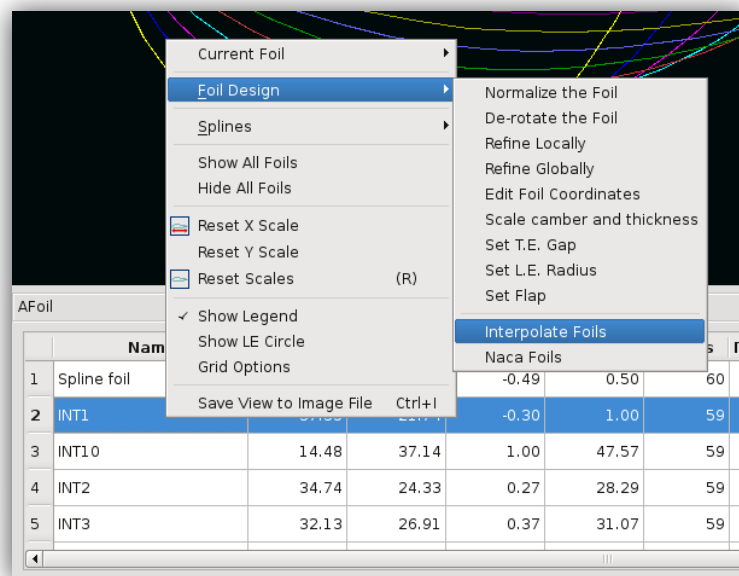


Imagen A2.4. Captura de la situación del menú de interpolación

En la imagen se indican las opciones, y una vez seleccionadas estas opciones, aparecerá el menú que se indica en la imagen A2.5

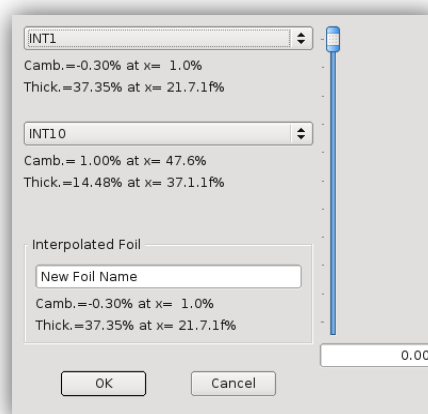


Imagen A2.5. Captura del menú de interpolación

En la imagen A2.5 se observa el menú, en el cual elegíamos los dos perfiles entre los que interpolar y el porcentaje de interpolación (la barra vertical en el lateral), con la opción del porcentaje es con la cual se va a generar todos los perfiles intermedios, eligiendo en cada caso un poco más de ese porcentaje.

Finalmente se obtienen todos los perfiles intermedios deseados. La cantidad de perfiles intermedios depende de los incrementos de porcentaje que hayamos ido eligiendo. Mientras se realiza el proceso hay que comprobar la coherencia en la forma, porque si la circunferencia se ha generado al revés a partir de los puntos que obtuvimos con el programa Fortran, aunque parezca igual, al crear perfiles intermedios obtendremos resultados erróneos en los perfiles intermedios.

El resultado de los perfiles creados se ve en la imagen A2.6.

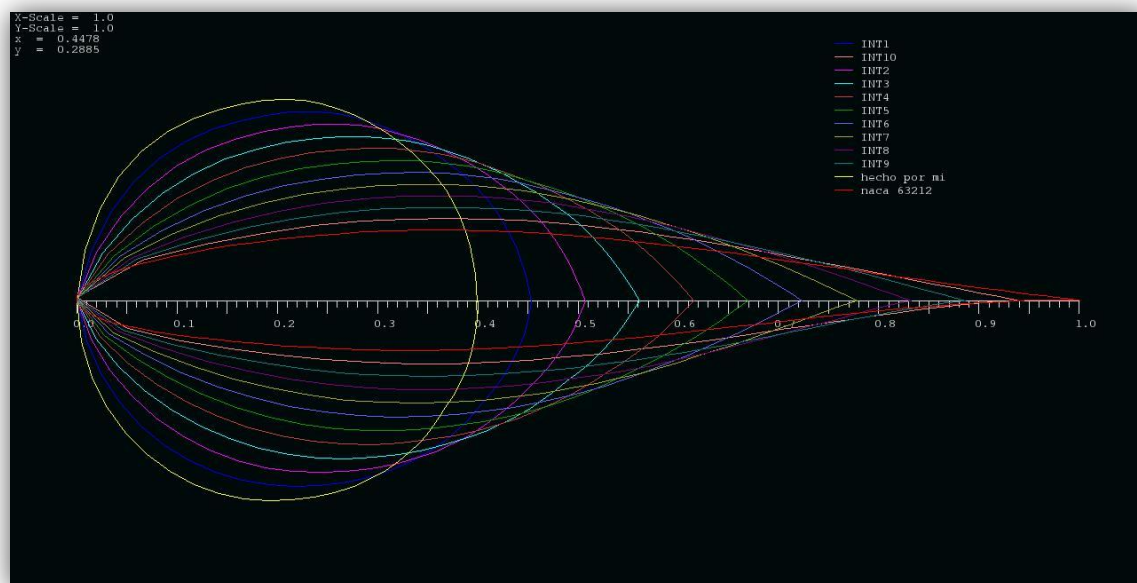


Imagen A2.6. Perfiles interpolados en el QBlade

Si nos fijamos bien, los perfiles intermedios creados, tienen un problema cuando llegan a los extremos, y es que al estar definidos por pocos puntos, lo que debería ser una curva, se convierte en líneas rectas. En la imagen A2.7 se muestra una ampliación de la zona para mostrar este hecho.

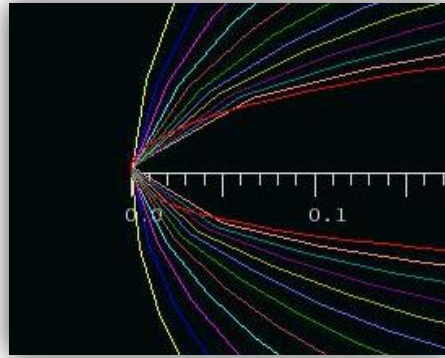


Imagen A2.7. Captura del extremo de los perfiles

Podría parecer un gran error a solucionar, pero no hay que preocuparse por ello, puesto que cuando introducimos los datos en el programa GID y creamos una “Línea Nurbs”, que es como estamos haciendo todos los perfiles, resulta que este tipo de líneas están pensadas para generar curvatura entre los puntos, y así nos quedan los perfiles con la forma totalmente coherente y sin esas rectas que darían muchos problemas.

En la imagen A2.8 se aprecia esa curvatura en los perfiles una vez importados en el programa GID.

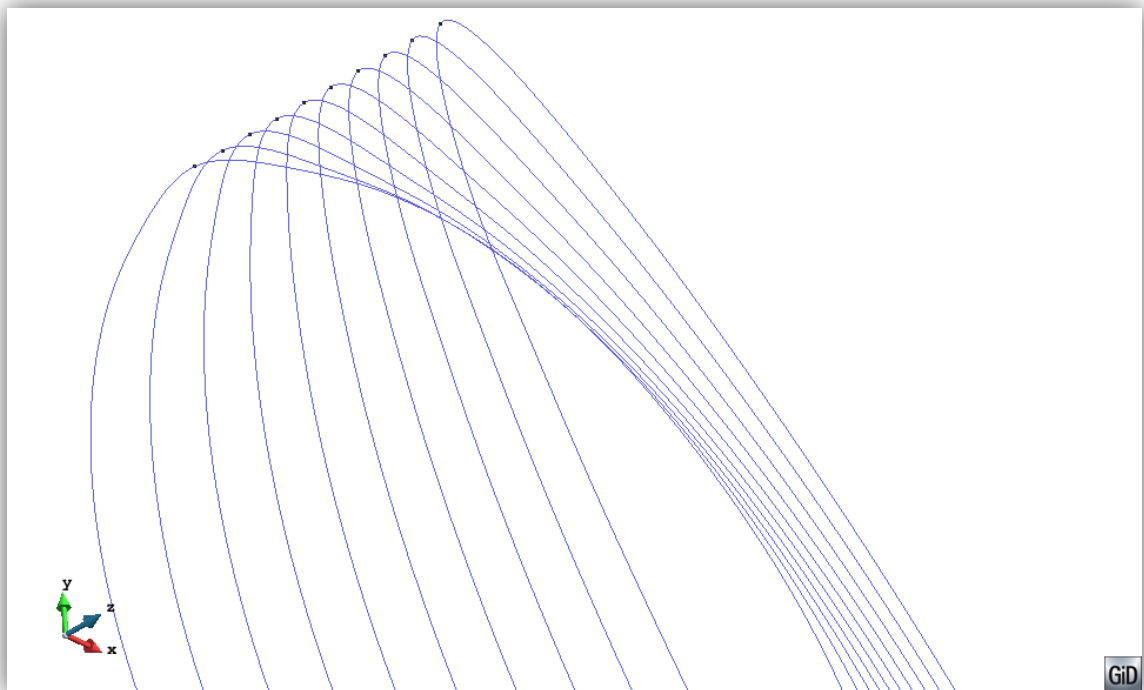


Imagen A2.8. Bordes de los perfiles en GID

Para acabar con el proceso de crear los perfiles intermedios, sólo queda exportar en un archivo de datos los perfiles que se han creado. Para ello iremos al menú de la parte superior, en el submenú “Splines” y ahí ya se encuentra la opción “Export to File”, como se puede ver en la imagen A2.9

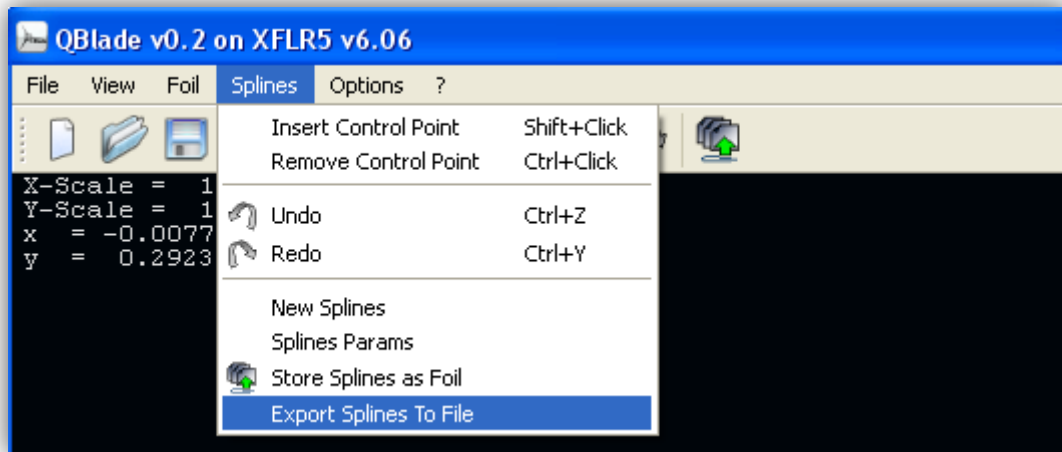


Imagen A2.9. Menú para exportar perfiles

Teniendo que exportar uno a uno todos los perfiles intermedios, es conveniente guardarlos con unos nombres consecutivos, de forma que luego que se pueda diferenciar el orden a la hora de introducirlos al programa GID.

Anexo III. Programas Fortran 90 para generar el rotor

Para realizar la geometría a mano en el programa GID se precisaba mucho trabajo. Realizar los mismos pasos una y otra vez, tener que repetir todo cada vez que se encuentra un error, y en general tener que empezar de cero cada vez que se quiera cambiar algo. Por eso se decidió invertir parte del tiempo en intentar automatizar la entrada de datos para que cualquier cambio en la configuración del aerogenerador no obligase a realizar el modelo desde cero otra vez.

En el caso del programa GID existía la posibilidad de introducir esos pasos de forma escrita importando un archivo de comandos llamado “bach file”. La primera tarea fue desentrañar cómo se debían escribir las operaciones que necesitamos en el lenguaje que GID utiliza. Como se explica en el Anexo I, se fueron obteniendo mediante experimentación.

Pero aun así existía el inconveniente de que había que incluir cientos de esas órdenes para poder generar la geometría del rotor, con similares problemas en cuanto a errores que en el caso anterior.

En este punto es donde entró en escena la programación Fortran. Mediante unos sencillos programas realizados con Fortran 90, se generan distintos archivos de comandos, que, importados desde el programa GID, generan la geometría deseada.

Se eligió este tipo de programación por su sencillez y por su adecuación para la tarea que se necesitaba realizar, que era escribir en un archivo de comandos repitiendo muchas veces lo mismo, variando determinados parámetros como se verá más adelante. Aunque añadía la tarea de aprender el lenguaje y la sintaxis de este tipo de programación, las ventajas que ofrecía a la hora de ahorrar tiempo una vez creados los programas eran suficientes como para trabajar en ello.

Además, trabajando en entorno Linux, teníamos muchas facilidades para poder programar en el lenguaje Fortran 90.

Así pues lo que había que hacer era generar unos archivos similares a los “bach files” de forma que importando desde el programa GID se obtuviera el rotor completo.

Para generar los “bach files”, se empleó la idea de “dividir” en partes como se ha visto en la sección 2, y es importante comentar que la decisión de porqué “dividir” en esas tres piezas para unir las posteriormente no es algo aleatorio, sino por simplificar la programación, puesto que cuando se crean por separado, la numeración de las líneas sigue un orden determinado y esto se emplea a la hora de crear los bucles.

Además se decidió hacer en partes distintas puesto que así se podrían encontrar los errores más fácilmente. Podría generarse toda la geometría del rotor con un solo programa, pero eso conllevaba un riesgo a la hora de depurar todos los errores, puesto que si no se puede identificar el error no se puede corregir

Los distintos programas realizados tienen como misión generar las siguientes geometrías:

- Un primer programa dedicado a editar el buje, creando tres cilindros para unir las palas al buje. En este caso se creó un programa adicional para obtener unos datos que debemos introducir en el programa principal de editar el buje.
- Un programa que importe los datos de perfiles intermedios entre el NACA 63 212 y el circular, los perfiles que hemos creado con el programa QBlade, tal como se explica en el anexo II
- Dos programas dedicados a generar las palas, uno primero para crear las secciones intermedias y líneas de unión y otro para generar las superficies entre las secciones.

Por último la parte de unir los perfiles intermedios con el buje y las palas, se realizó con dos “bach files” diseñados a propósito para crear las líneas que unen los perfiles intermedios y las superficies en la zona de los perfiles intermedios. Pero esta última tarea es más manual que automática como ocurría en los casos anteriores.

A continuación se va a describir a grandes rasgos lo que hace cada programa:

Programa para editar el buje

En este programa, partimos de un buje que se ha generado manualmente en un archivo GID, y al cual añadiremos unas conexiones cilíndricas de modo que sirvan de empalme entre la pala y el buje.

En este caso hay un problema muy importante, y es que hay que alinear las palas y los cilindros para que se adapten correctamente a la hora de unirlos. Por eso mismo se optó por alinear el punto $1/3$ de las secciones pala, que a su vez servía de punto alineado en toda la geometría de la pala. Tal como se muestra en la imagen A3.1

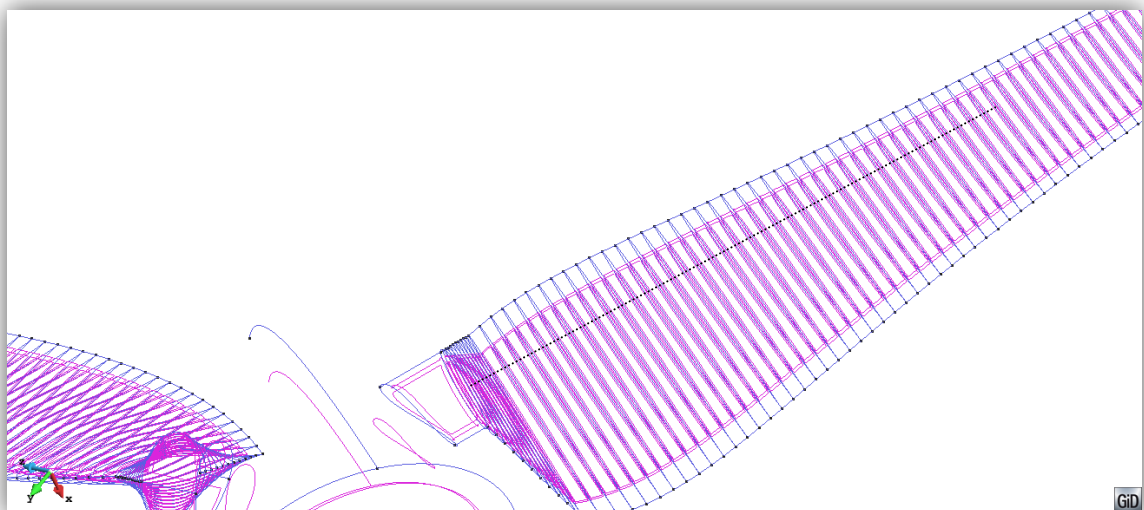


Imagen A3.1. La línea de puntos es la prolongación de los puntos situados en $1/3$ de la cuerda cada sección

Por tanto para calcular este punto y emplearlo como centro de los cilindros, tenemos que introducir en el programa los datos de las secciones de la pala y la geometría del perfil NACA 63 212.

A su vez, también había que contar con las secciones intermedias, y para ello se añadió un espacio entre el primer dato de cuerda y el final de los cilindros, para que entre los dos pudiesen entrar las superficies intermedias.

Finalmente, lo que nos hace el programa es añadirle a un buje creado previamente, tres cilindros unidos al buje, preparando la unión con los perfiles intermedios creados en QBlade. El resultado se contempla en las imágenes A3.2 y A3.4

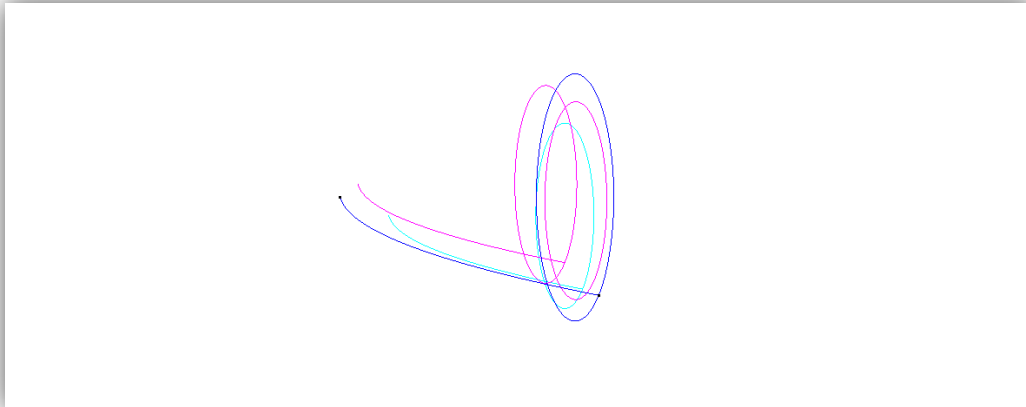


Imagen A3.2. Buje solo

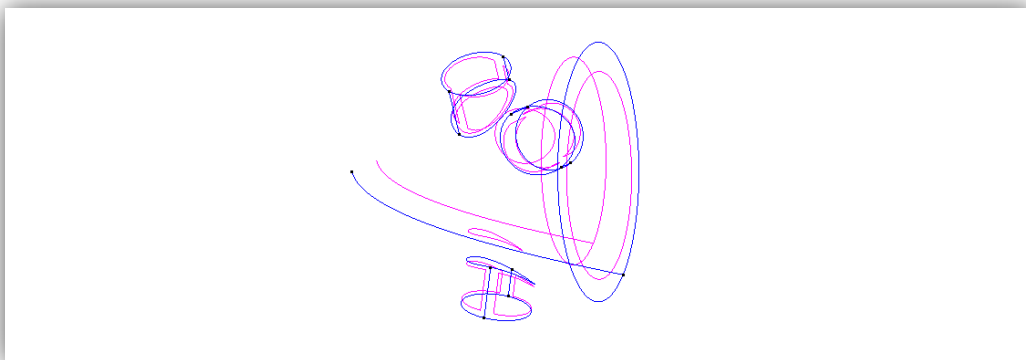


Imagen A3.3. Buje con las uniones añadidas

Programa para añadir los perfiles intermedios

Este programa es el más sencillo de los creados, puesto que lo único que tiene que hacer es importar un archivo de datos con los puntos que definen los perfiles, y con ello crear una “Línea Nurbs”, un comando que se explica en el anexo I y que es muy simple.

Lo único que se ha tenido en cuenta especialmente, fue en añadir una opción para elegir el número de puntos que definen esos perfiles. Si están extraídos desde QBlade, todos tendrán el mismo número de nodos, pero si por lo que fuera se quisieran importar otro tipo de perfiles intermedios con otro número de puntos que definan el perfil, pues está la opción que permite decirle al programa cuantos puntos tiene el perfil. De este modo no habría que entrar a modificar el programa si hubiera cambios.

El método llevado a cabo para crear las superficies intermedias es el siguiente:

- Primero, se van importando y creando las distintas superficies, escalándolas por el valor de la cuerda en la primera sección de pala, y girándolas el mismo ángulo “ θ ”, puesto que inicialmente son unitarias y tienen que estar alineadas con la sección de la pala para acoplarse.
- Segundo, una vez se obtienen las superficies correspondientes a una unión de pala, se rota todo 120° respecto al eje del buje, de esta forma es como si estuviésemos cambiando de pala.
- Tercero, repetimos los perfiles intermedios para la nueva pala, y rotamos de nuevo 120° , acabando con una nueva tanda de perfiles intermedios.

A parte de tener que girar y escalar cada perfil, hay que dividirlos en dos partes como mínimo, puesto que el programa GID no permite trabajar con una superficie definida por una línea que empieza y acaba en el mismo punto.

Para ello utilizamos como se explico en la sección 2, la herramienta de dividir una línea por un punto.

El resultado de este programa son las tres zonas intermedias tal como se muestra en la imagen A3.4

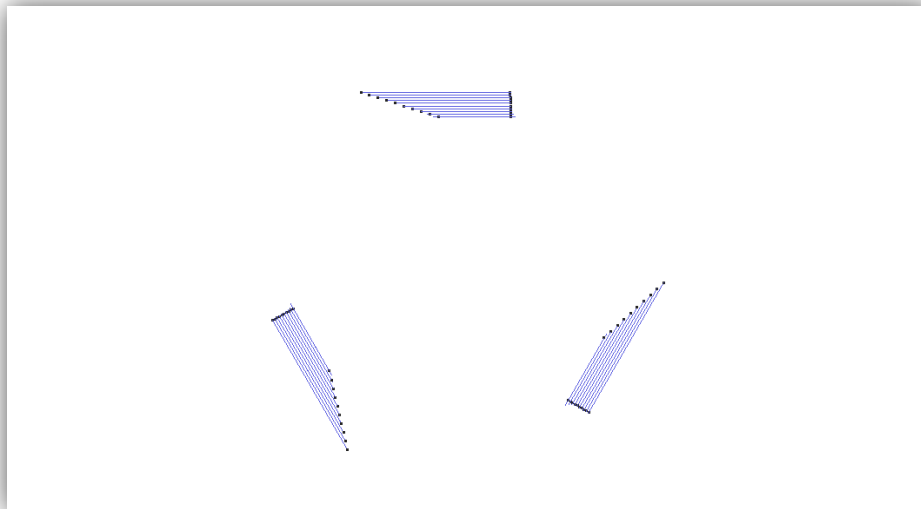


Imagen A3.4. Perfiles intermedios entre las palas del rotor y las uniones al buje

Programa para generar las palas

Este es el caso más completo de los tres, ya que tenemos que emplear casi todos los comandos del programa GID. Por un lado generando las líneas de las secciones y sus uniones y por otro lado teniendo en cuenta que la numeración será fundamental a la hora de poder simplificar la creación de superficies.

Se parte del archivo de datos de los puntos del perfil NACA 63 212, y del fichero que contiene los datos de diseño de las palas del rotor. Lo primero será crear el perfil unitario NACA 63 212, unitario puesto que la cuerda en este caso es la unidad.

A este perfil lo debemos: dividir en varias partes la línea, copiar, trasladar, rotar y escalar. Se realizarán estos tres pasos para cada una de las secciones que definen la pala, y a la vez que las vamos haciendo, hay que ir haciendo las líneas de unión entre cada perfil, de modo que la numeración de estas líneas lleve un orden lógico.

A este programa se le añadió la opción de elegir por donde dividir el perfil en zonas distintas, si por abajo, por arriba o por el borde de ataque. Esto resultó

útil a la hora de modificar el programa especialmente para crear otro tipo de mallas con más elementos en la zona del borde de ataque, tal como se muestra en la imagen 3.3 de la sección 3.

La creación de los perfiles de la pala se refleja en la imagen A3.5, en este caso se ha dividido la sección en dos partes por la zona del borde de ataque.

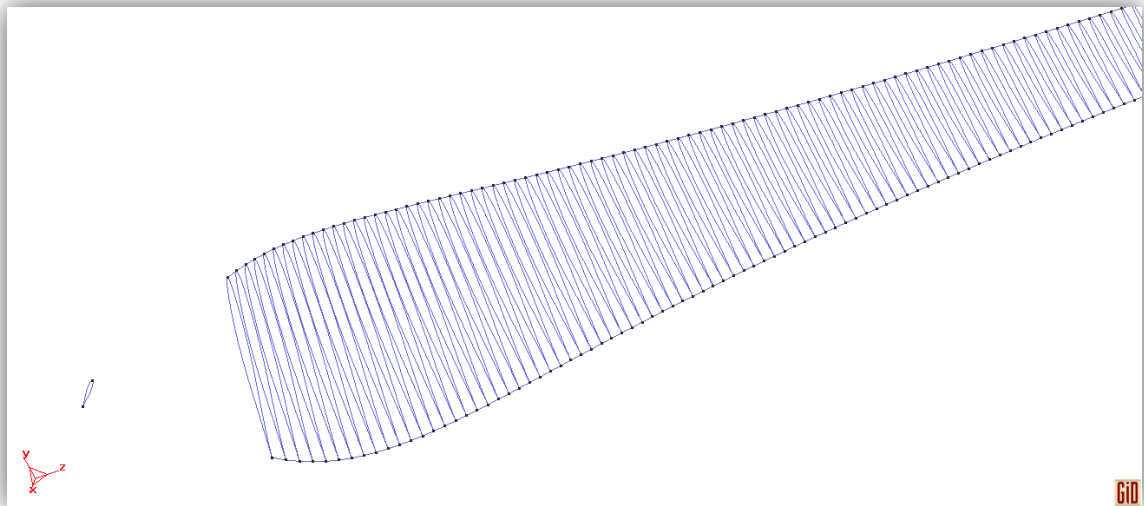


Imagen A3.5. Perfiles que definen la pala

En el caso particular del modelo en el cuál se intentaba reducir el tamaño de los elementos en la zona del borde de ataque (como se explicaba en el punto 3), en la imagen A3.6 se muestra cómo es una pala del programa modificado, con la sección dividida en tres partes, evidentemente también se adaptó el programa de generar superficies.

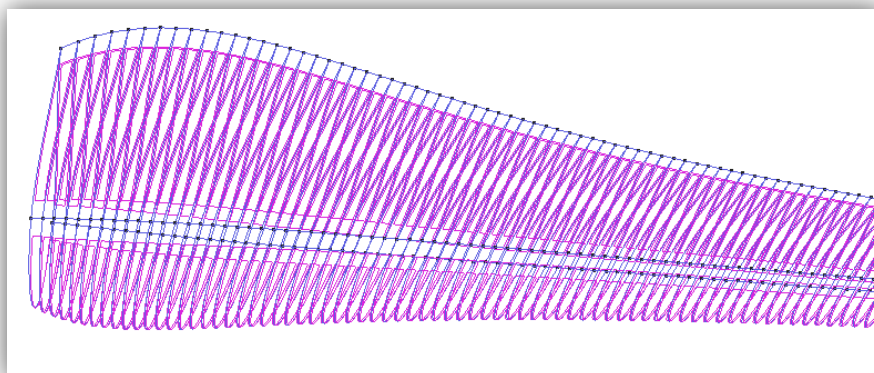


Imagen A3.6. Superficies añadidas entre secciones de la pala

Una vez está creada una pala, al igual que hacía el programa de importar los perfiles intermedios, se gira todo 120° y se comienza de nuevo el proceso para crear otra pala.

Una vez obtenidos estos perfiles de las palas, el programa encargado de generar las superficies es muy simple, puesto que básicamente lo único que tiene que hacer es decir qué líneas forman cada superficie. Ahí estaba la importancia de mantener un orden lógico de las líneas para que los bucles de este programa fueran lo más sencillos posibles.

En la imagen A3.7 se ve como ya existen superficies a lo largo de la pala.

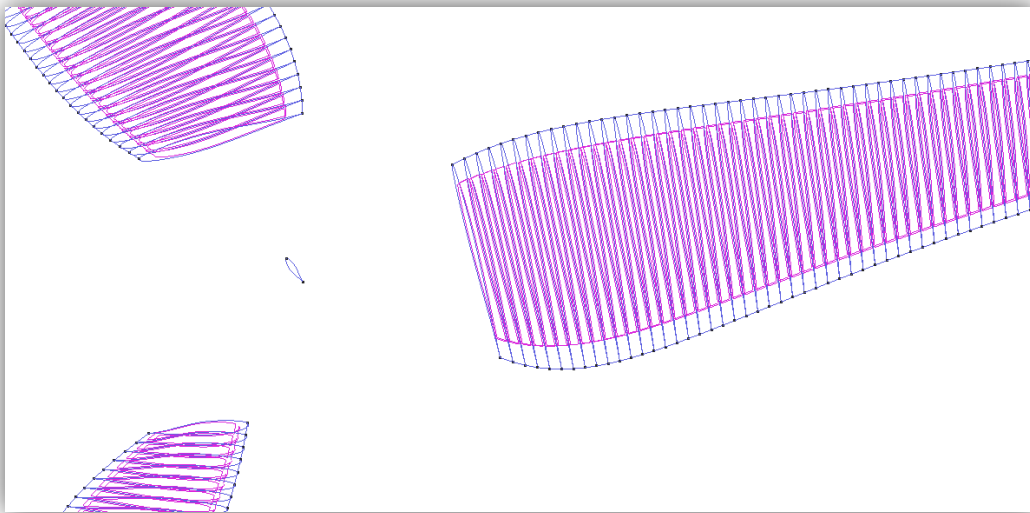


Imagen A3.7. Superficies creadas en toda la geometría de las palas

Evidentemente, todas las superficies son las que se forman por el exterior. No tiene sentido generar superficies en las secciones interiores, puesto que al unir las tres zonas, lo de dentro tiene que ser todo hueco, para poder generar el volumen.

Por último, cada uno de los programas se han ido guardando en archivos GID distintos. Para acabar habría que unirlos en un solo archivo y completar las superficies intermedias.

El resultado final, como ya se vio en la sección 2, es el que se refleja en las imágenes A3.8 y A3.9

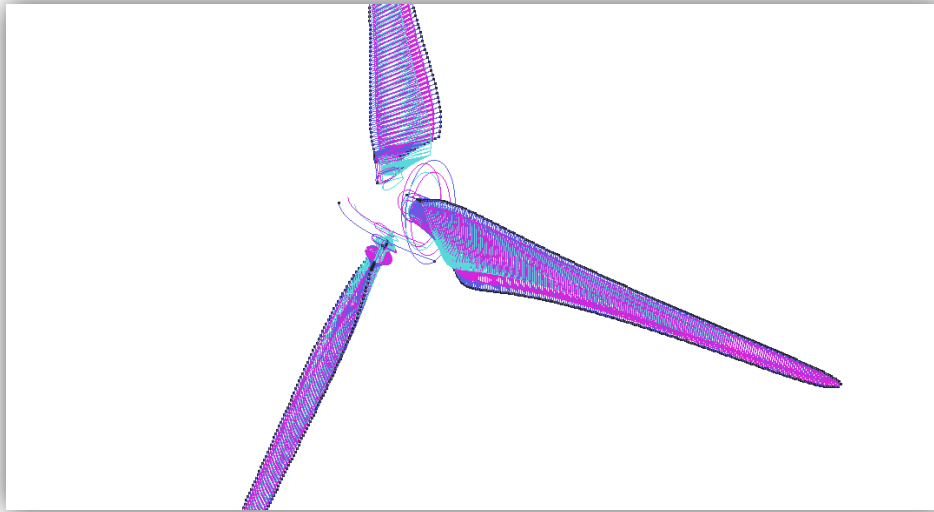


Imagen A3.8. Modelo del volumen del rotor completo

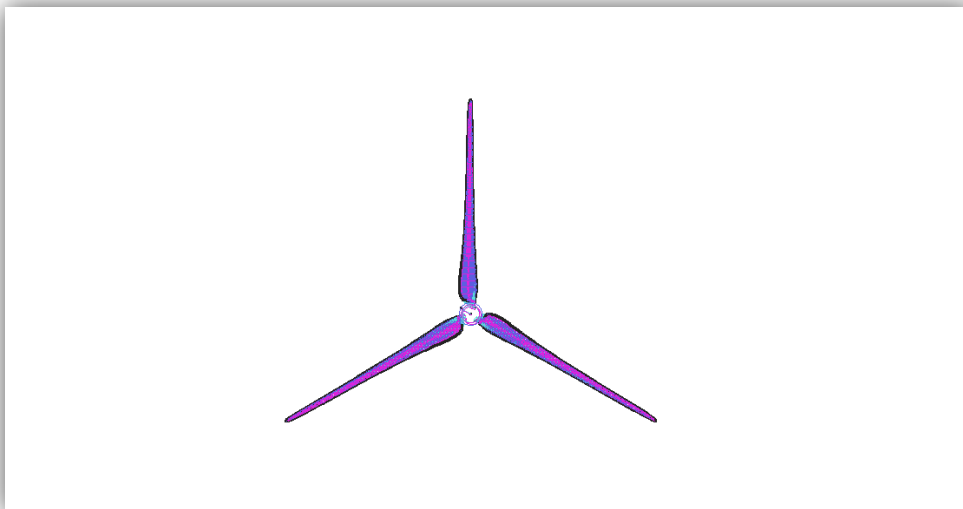


Imagen A3.9. Alzado del rotor completado

Este modelo una vez completarlo, como comprobación de que está bien acabado el volumen, hay que realizar un mallado satisfactorio del rotor, en caso de que no se pudiera realizar el mallado habría que buscar y depurar errores en el modelo.