



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Simulación mediante CFD del flujo alrededor de velas de barco.

Autor:

Peña Santiago, Josué

Tutor:

**Melgar Bachiller, Andrés
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, enero, 2018.

Gracias a mis padres, a mi hermano y a mi novia por su apoyo.

Gracias a mi tutor Andrés Melgar por su dedicación y ayuda con las dudas a lo largo de todo el proyecto.

Gracias a Jose Sierra y Carlos Fiz por su ayuda cuando la necesité.

Índice

Resumen.....	3
1. Introducción.....	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Justificación	6
1.3. Estructura.....	6
1.4. Objetivos	7
1.5. Limitaciones.....	7
2. Fundamentos de navegación a vela.....	9
2.1. Definiciones de conceptos básicos en navegación	9
2.2. Principio físico de funcionamiento de la vela.....	12
2.3. Fuerzas generadas en un velero	14
2.4. Clase 470.....	16
3. Generación del modelo	19
3.1. Fundamentación teórica	19
3.2. Modelo en Excel	21
3.3. Modelo en Catia.....	26
3.4. Generación de la malla	28
3.4.1. Modelo en DesignModeler	28
3.4.2. Modelo en Meshing.....	29
3.5. Modelo en Fluent.....	32
3.5.1. Tipo de flujo	32
3.5.2. Valores de referencia.....	32
3.5.3. Condiciones de contorno.....	33
3.5.4. Turbulencia	33
3.5.5. Algoritmo de resolución	34
3.5.6. Sensibilidad de malla.....	34
4. Planteamiento de las simulaciones a realizar y tratamiento de los resultados.....	39
4.1. Planteamiento de las simulaciones a realizar	39
4.2. Validez de resultados	41

4.3.	Presentación de resultados	44
4.3.1.	Tablas de soluciones	45
4.3.2.	Gráficos de las tablas de soluciones	49
4.3.3.	Contornos de velocidad	62
4.3.4.	Contornos de presión.....	64
4.3.5.	Contornos de vorticidad.....	66
4.3.6.	Líneas de corriente	68
4.3.7.	Gráficos de presión en el perfil de la vela	70
5.	Conclusiones y trabajos posteriores.....	75
5.1.	Conclusiones.....	75
5.1.1.	Conclusiones de la generación del modelo	75
5.1.2.	Conclusiones del comportamiento del velero a través del estudio de las fuerzas aerodinámicas	77
5.1.3.	Conclusiones fluidodinámicas del flujo alrededor del perfil	78
5.2.	Trabajos posteriores.....	79
6.	Bibliografía.....	81
Anexo.....		83
	Contornos de velocidad	83
	Contornos de presión.....	85
	Contornos de vorticidad.....	87
	Líneas de corriente	89
	Gráficos de presión en el perfil de la vela	91
	Gráficos de Y^+ en el perfil de la vela	93

Resumen

En este proyecto se estudiará, en dos dimensiones y mediante técnicas CFD, el flujo de aire alrededor del perfil de una vela del velero 470. La forma de la curva del perfil viene dada por un modelo teórico generado, implementado en Excel. Para elaborar el modelo final se usan programas como Catia y Ansys. El flujo es resuelto en Fluent. La herramienta creada para originar el modelo es flexible para facilitar diferentes trabajos posteriores sobre el 470. Las variables investigadas son fuerzas y posiciones óptimas del velero; contornos de velocidad, presión y vorticidad; líneas de corriente y gráficos de presión en el perfil.

Palabras clave:

470 CFD vela barco simulación

This project analyzes in two dimensions by CFD techniques the airflow around the sail's profile of a 470 sailboat. The shape curve's profile is generated by a theoretical model implemented on Excel. In order to develop the final model, programs such as Catia and Ansys are used. Airflow is resolved on Fluent. The tool created to originate the model is flexible so as to facilitate different subsequent works on 470. The variables investigated are forces and optimal sailboat positions; contours of speed, pressure and vorticity; streamlines and pressure graphics on the profile.

Keywords:

470 CFD sail boat simulation

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Se han encontrado diversos trabajos que abordan temas similares. A continuación, se irá describiendo en qué se centran.

En primer lugar, se hablará del proyecto llamado: “Una explicación del análisis del flujo de la vela” (Gerritsen et al., 2003). Es un trabajo realizado por la Universidad de Stanford. Se centra en el estudio en dos dimensiones mediante CFD de velas tradicionales. Inicialmente con una vela y, más tarde, dos. También incluye la validación de una vela con túnel de viento. Calcula las presiones en las velas y extrae sus fuerzas.

En segundo lugar, se comentará un trabajo denominado “Análisis de las condiciones de flujo en una vela de barco usando dinámica computacional de fluidos” (Favarim y Rodrigues, 2013). Es un estudio de una vela simétrica en dos dimensiones usando CFD. Los resultados son los coeficientes de arrastre y sustentación. Incluye la validación con túnel de viento.

El siguiente, es un trabajo de la Universidad de Lisboa titulado “Análisis Numérico de las características aerodinámicas de una vela rígida aplicando dinámica de fluidos computacional” (Lopes, 2014). Ensayo con técnicas CFD una vela rígida. Los elegidos son varios perfiles NACA0015, aunque, a mayores, estudia un modelo de vela tradicional. Primero analiza los perfiles en 2D y, después, calcula en 3D uno de los modelos con perfil NACA. Los resultados obtenidos son relaciones de aspecto y fuerzas de deriva y empuje.

El sucesivo es un trabajo de la Universidad Austral de Chile bautizado: “Prototipo de vela rígida principal para la regata de la copa América 2013 según regla AC72” (Flórez, 2011). Ensayo tridimensionalmente con CFD una vela rígida con distintos perfiles NACA. Estudia presiones, líneas de flujo, capa límite, ángulo de Stall y fuerzas de deriva y empuje.

Asimismo, existen otros escritos como es la “Base de datos de formas de velas vs. rendimiento de velas y validación de cálculos numéricos para condiciones de viento” (Masuyama, Tahara, Fukasawa, y Maeda, 2007). Aquí se experimenta, empleando CFD, velas tradicionales en 3D para, más tarde, desglosarlo en 2D a diferentes alturas y ángulos de ataque. Lo hace sin foque y con dos tamaños de foque diferentes. Al final incorpora el mástil para ver su influencia. Estudia centro de esfuerzos y coeficientes de arrastre y sustentación.

Por último, añadir que, hay un documento denominado “ORC Velocity Prediction Program Documentation 2016” (Offshore Racing Congress, 2016a), que recoge métodos para calcular velocidades teóricas mediante fórmulas, en todo tipo de veleros, a distintas velocidades de aire y direcciones. Tienen en cuenta multitud de variables y se hacen respetando el reglamento oficial de medidas de barcos. El “Reglamento Internacional

Measurement System 2017” (Offshore Racing Congress, 2016b) es el más actualizado. Las velocidades son calculadas para aplicarlas como coeficientes de corrección en regatas en el “Sistema de Ratings ORC 2017” (Offshore Racing Congress, 2016c).

1.2. Justificación

En un primer momento, es necesario reseñar que el trabajo también está pensado como una herramienta para seguir desarrollando investigaciones sobre el 470 con diferentes velas y reglajes, y, por tanto, no hay que tener en cuenta, únicamente, los datos obtenidos.

Se ha hablado sobre diferentes documentos con relación al tema que se trabaja aquí, pero en ninguno de ellos se desarrolla, concretamente, el caso de los veleros 470 mediante CFD.

Además, exceptuando en el documento ORC (2016a) y en el trabajo de Flórez (2011) no se estudiaban muchos ángulos de ataque, centrándose en ángulos de ataque pequeños.

Otro rasgo que considerar, es que, salvo en los documentos de Gerritsen (et al, 2003), de Favarim y Rodrigues (2013) y de Lopes (2014), no se calculan valores de fuerzas. Pero el primero de ellos no muestra resultados numéricos concretos ni gráficos y, los dos restantes, se centran en estudiar velas rígidas de perfil NACA.

Finalmente, tras analizar lo expuesto anteriormente, ya que ninguno de los trabajos comentados se ajusta a lo que se quiere estudiar, se cree necesaria la realización del presente proyecto.

Completar el apartado sosteniendo que el trabajo no sólo está pensado para el ámbito de la investigación científica, también puede servir como material didáctico. Por ejemplo, podría ser utilizado para dar clase a principiantes o niños en clubes de vela, como el Club de vela de Santoña.

1.3. Estructura

El presente trabajo se divide en cinco grandes capítulos y un anexo con figuras. Seguidamente, se resumirán brevemente sus capítulos.

El primer capítulo corresponde a la introducción, donde se va a hablar de los antecedentes, justificaciones, limitaciones y objetivos del trabajo.

El segundo capítulo tratará sobre conceptos básicos de la navegación, principios físicos del funcionamiento de la vela, fuerzas generadas en el velero y presentación del velero real.

El tercero corresponde a la generación del modelo, donde se explicará, tras una fundamentación teórica, cómo se ha realizado, utilizando los diferentes programas e incluyendo justificaciones de porqué se ha hecho así.

El cuarto capítulo expondrá el planteamiento de las simulaciones a realizar, la validación de los resultados y la presentación de los mismos, junto a su análisis.

El último capítulo se reserva para las conclusiones del trabajo y sus posibles proyectos posteriores.

1.4. Objetivos

A la hora de componer el trabajo se han planteado una serie de objetivos a alcanzar:

- Crear una herramienta flexible para el estudio del flujo de aire, para todo tipo, número y posición de velas y toda clase de veleros.
- Llegar a conclusiones didácticas sirviéndose de los gráficos y resultados que se generarán.
- Obtener más datos sobre el caso concreto del velero 470.
- Aprender sobre el flujo de aire alrededor de velas de barco, dinámica computacional de fluidos y programas de Ansys.

1.5. Limitaciones

El proyecto descrito en el documento tiene una serie de limitaciones enumeradas a continuación:

- Simulación bidimensional, no considerando la coordenada correspondiente a la altura. Para atenuar este problema habitualmente se simula la vela a diferentes alturas. En esta ocasión, por simplificar, sólo se analizará la vela en su zona inferior.
- No se modelan todas las velas del velero 470. Se ha calculado una vela, la mayor.
- La simulación se realiza con una vela rígida, no se deformará ante la acción del flujo incidente.
- El perfil de presiones en la vela será constante, dando como resultado una vela simétrica.
- No se consideran los efectos aerodinámicos del mástil sobre la vela.
- No se valoran los efectos aerodinámicos existentes en el resto del velero, como podría ser la aerodinámica del casco.

- No se realizan validaciones prácticas como ensayos en túneles de viento.
- No se tienen en cuenta las fuerzas hidrodinámicas producidas en el velero.

2. Fundamentos de navegación a vela

El objetivo de este apartado es exponer nociones esenciales sobre la navegación a vela, adquiriendo los conocimientos necesarios para aplicarlos más adelante en el proyecto.

2.1. Definiciones de conceptos básicos en navegación

Inicialmente, se definirán unos conceptos de terminología náutica, ayudándonos de figuras. En la primera imagen, se representan las direcciones cardinales del velero y los elementos básicos para controlarlo.

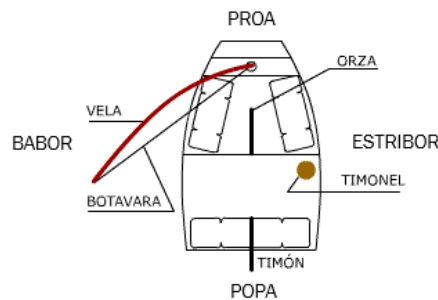


Figura 2. 1: Direcciones cardinales y elementos básicos de control del velero (Cloos, 2017)

Definiéndose de la siguiente manera:

- Proa: parte delantera del barco.
- Popa: parte trasera del barco
- Babor: parte izquierda del barco respecto a una referencia fija situada en la popa.
- Estribor: parte derecha del barco respecto a una referencia fija situada en la popa.
- Vela: conjunto de láminas de tela o plástico unidas con la finalidad de impulsar una embarcación usando la fuerza del viento.
- Botavara: palo horizontal usado para orientar la vela.
- Orza o quilla: pieza, situada bajo el casco del barco, que aprovecha la fuerza del agua para contrarrestar la fuerza de deriva (sobre el navío) producida en la vela.
- Timón: aparato usado para controlar la dirección del barco.
- Timonel: persona que dirige el velero.

Además, la dirección por la que viene el viento al barco se llama barlovento, y por la que se marcha, sotavento. Esto se puede diferenciar en la figura mostrada a continuación:

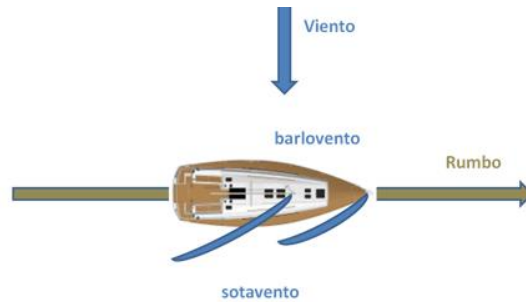


Figura 2. 2: Direcciones del aire (Singladuras Náuticas Canaleras, 2017)

Otro concepto que introducir es el nombre del rumbo de navegación respecto al viento. Igualmente, se concreta cuando el navío está amurado a babor o estribor. Todo esto se aprecia en la imagen siguiente:

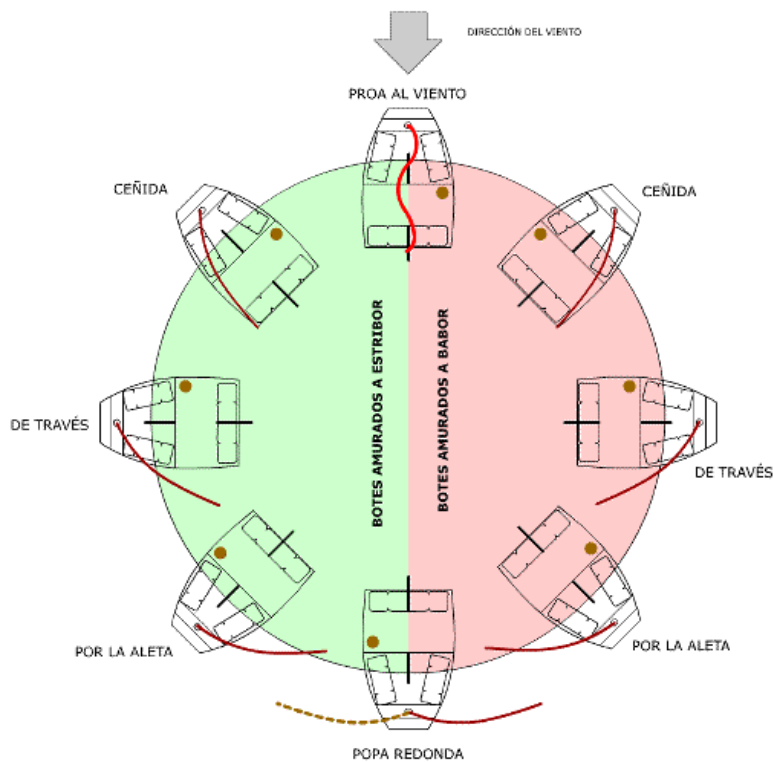


Figura 2. 3: Rumbos de navegación y amuras según dirección del aire (Cloos, 2017)

Refiriéndose exactamente a:

- Proa al viento: navegar totalmente contra el viento. No es factible ejecutarlo.
- Ceñida: navegar acercándose el viento lateralmente por proa, hasta casi los noventa grados. A menudo se llama, también, navegar en ceñida, a hacerlo con el ángulo más cercano a la dirección del aire posible.
- De través: navegar lateralmente respecto a la dirección del viento, a noventa grados.

- Por la aleta o largo: navegar acercándose el viento lateralmente por popa, concretamente desde cerca de los noventa grados hasta casi los ciento ochenta.
- Popa redonda o empopada: navegar totalmente a favor el viento.
- Amurado a babor: navegar acercándose el viento por babor a la embarcación, es decir, barlovento coincide con babor.
- Amurado a estribor: navegar acercándose el viento por estribor a la embarcación, es decir, barlovento coincide con estribor.

En el dibujo anterior, se podía reparar, al mismo tiempo, como al navegar proa al viento, la vela flamea, es decir, no mantiene su forma original. Por lo anterior y porque, aun no siendo así, el barco sería incapaz de avanzar en esta posición, no se navega en con esta configuración. La franja angular, del navío respecto al aire, en la que no puede avanzar es la denominada zona muerta. Si se quiere ir contra el viento, lo que se hace es navegar en ceñida, zigzagueando. Esto se ejemplifica en la ilustración sucesiva:



Figura 2. 4: Rumbo navegación contra el viento (Díaz, 2017)

Indicar que durante el proyecto se va a trabajar con el denominado viento aparente. Por comodidad, será llamado velocidad de entrada de aire, pero realmente es la resultante de la velocidad del aire con la velocidad del barco. Esto es mostrado en la imagen posterior:

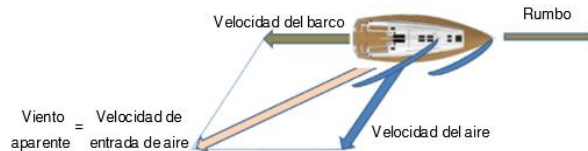


Figura 2. 5: Viento aparente (Singladuras Náuticas Canaleras, 2017)

También hay que añadir los conceptos de cazar y filar. Cazar es acercar la vela al eje central del barco y filar es su opuesto, alejarla.

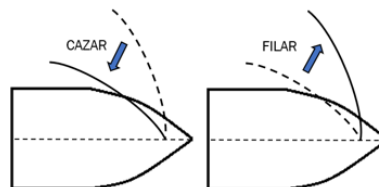


Figura 2. 6: Cazar y filar

Explicar, por último, dos términos que tienen más que ver con la geometría del perfil que con conceptos náuticos, presentados en la figura de abajo:

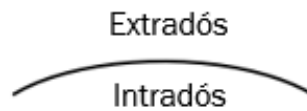


Figura 2. 7: Extradós e intradós.

El extradós es la parte externa de la curvatura del perfil, mientras que el intradós es la parte interna de la curvatura del perfil.

2.2. Principio físico de funcionamiento de la vela

Existen varias teorías sobre el principio físico que apoya el funcionamiento de una vela navegando contra el viento. Son las mismas para el ala de un avión, pues tienen igual base. Todas ellas se fundamentan en revelar el origen de la sustentación. Las tres explicaciones son las sucesivas (Irausquin, 2012, p. 8):

- Principio de Bernoulli
- Tercera Ley de Newton. Acción-reacción.
- Circulación. Ley de Kutta-Joukowski.

Por abreviar, sólo es abordada una. El proceso expuesto a continuación, es la teoría más clásica. Según esta explicación, el principio físico principal, sobre el cual se basa el funcionamiento de una vela, es el principio de Bernoulli. Dicha demostración es correcta, aun así, muchas veces su interpretación tiene ciertas deficiencias (Irausquin, 2012, p. 35). La ecuación que fundamenta el principio es esta (White, 2010, p. 185):

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 = cte \quad (2. 1)$$

Siendo:

- P_1 : presión absoluta en la posición 1 expresada en Pascales.
- P_2 : presión absoluta en la posición 2 expresada en Pascales.
- v_1 : velocidad absoluta en la posición 1 expresada en metros por segundo.
- v_2 : velocidad absoluta en la posición 2 expresada en metros por segundo.
- z_1 : altura de la posición 1 expresada en metros.
- z_2 : altura de la posición 2 expresada en metros.
- ρ : densidad del fluido, aire en nuestro caso, expresada en kilogramos por metro cúbico.

Como se va a hacer el estudio en dos dimensiones, la altura permanece constante, por lo que “ z_1 ” es igual a “ z_2 ”. La expresión se simplifica a:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = cte \quad (2.2)$$

Al observar la fórmula se llega a la conclusión que, para mantener la igualdad, una mayor velocidad va asociada a una menor presión, y viceversa. En este caso, el aumento de la velocidad en el extradós es la consecuencia de una disminución de presión (Irausquin, 2012, p. 21). Entonces, la pregunta es cuál es el causante de la disminución de presión. Pues bien, según Irausquin (2012, p. 22), Weltner y Ingelman-Sundberg y, Babinsky, lo atribuyen a la trayectoria curva que sigue el flujo en el borde de ataque del perfil. Esta trayectoria lleva asociada un gradiente de presión, causado por la aceleración radial, donde la presión es menor hacia el centro del giro (Irausquin, 2012, p. 23).

Por tanto, esa diferencia de presiones entre las dos caras de la vela genera la sustentación. Esta fuerza de sustentación es, en definitiva, la que produce la fuerza motriz de la vela.

Indicar que, con más velas, aunque el inicio de la sustentación en cada vela siga el mismo principio, se complica. Es debido a la interacción existente entre las velas. En cualquier caso, no está recogido aquí, ya que el proyecto será realizado con una vela solamente.

La capa límite antes mencionada, varía según diversos factores como son la forma del perfil y el ángulo de entrada del aire. Pero sigue una forma de este estilo en su cara a sotavento:

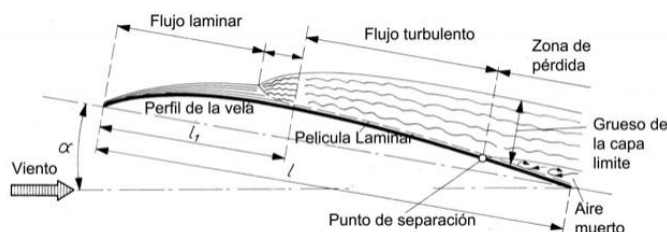


Figura 2. 8: Capa límite en la vela (Marchaj, 1975)

Navegando a favor del viento, la fuerza de resistencia va cobrando más importancia, teniendo una influencia máxima al navegar de empopada. En esta última configuración, la explicación física de la fuerza motriz es mucho más sencilla. La fuerza de resistencia empuja al velero tras chocar con la vela. Igualmente, es la diferencia de presión, entre las dos caras de la vela, la que genera el avance de la embarcación.

2.3. Fuerzas generadas en un velero

Aunque el estudio del proyecto será en dos dimensiones, en este apartado es necesario definir las fuerzas generadas en las tres dimensiones para comprender bien que se tiene que acotar la fuerza de deriva, evitando el vuelco de la embarcación.

Se empezará por la vela. La principal causante de la fuerza en la vela es la fuerza de presiones, definiéndose como (White, 2010 p. 155):

$$F_P = \iint P_{man} \cdot (-n) \cdot dA \quad (2.3)$$

Donde:

- F_P : fuerza de presión en la vela.
- P_{man} : presión manométrica.
- n : normal a la superficie de la vela.
- dA : diferencial de área de la vela.

Para calcular la fuerza total sobre la vela (F_T) también influye, aunque en menor medida, la fuerza viscosa. La fuerza viscosa existe dentro de la capa límite. Se define como (White, 2010):

$$F_V = \iint \tau \cdot dA \quad (2.4)$$

Donde:

- F_V : fuerza viscosa en la vela.
- τ : esfuerzo viscoso.

En total (White, 2010):

$$F_T = F_P + F_V \quad (2.5)$$

La fuerza total, se divide en una de resistencia y otra de sustentación:

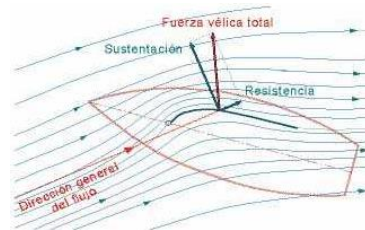


Figura 2. 9: Fuerzas de resistencia y sustentación en la vela (Reguera, 2014)

El valor de estas fuerzas depende de varios factores. Algunos de ellos son el ángulo del aire, la velocidad del aire y la forma y posición de la vela. Pero realmente no va a ser la descomposición de fuerzas en la vela más interesante. La importante es descomponerla en fuerza de avance y de deriva. Esta descomposición, junto al resto de fuerzas que influyen en el velero, viene representada en la imagen sucesiva:

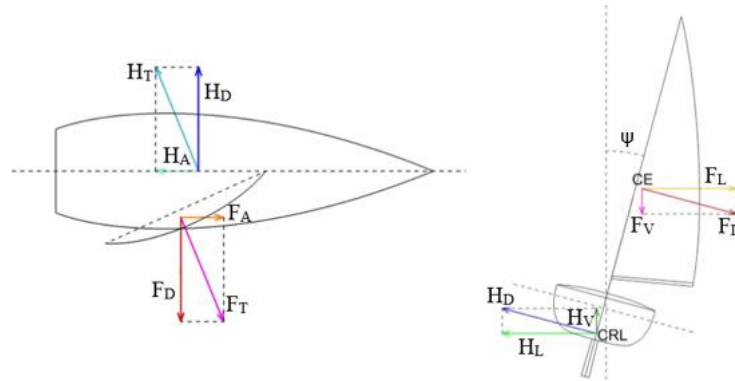


Figura 2. 10: Fuerzas en el velero (Gómez, 2014)

Siendo:

- F_T : Fuerza total producida por el aire sobre la vela.
- F_A : Fuerza de avance producida por el aire sobre la vela.
- F_D : Fuerza de deriva o de escora producida por el aire sobre la vela.
- F_L : Fuerza lateral producida por el aire sobre la vela.
- F_V : Fuerza vertical producida por el aire sobre la vela.
- H_T : Fuerza total producida por el agua sobre el casco.
- H_A : Fuerza de resistencia al avance producida por el agua sobre el casco.
- H_D : Fuerza antideriva producida por el agua sobre el casco.
- H_L : Fuerza lateral producida por el agua sobre el casco.
- H_V : Fuerza vertical producida por el agua sobre el casco.
- CE: centro de esfuerzos aerodinámicos sobre la vela.
- CRL: centro de resistencia lateral o centro de esfuerzos hidráulicos sobre el casco.
- ψ : Ángulo de escora o abatimiento del velero.

Observando la figura precedente y la descripción de sus fuerzas, se distingue que a las fuerzas aerodinámicas producidas en la vela se oponen las fuerzas hidrodinámicas producidas en el casco.

Fijándonos en el dibujo que muestra el barco en planta, se aprecia como a la fuerza de avance en la vela se opone la fuerza hidrodinámica de resistencia al avance en el casco. La resta entre estas dos fuerzas dará el avance del velero.

También, se diferencia cómo a la fuerza de deriva en la vela se contrapone una de antideriva en el casco. La fuerza de antideriva es la que evita que el navío vuelque, esa es la utilidad que tiene la quilla del barco. Pero la resistencia creada por la quilla tiene un límite, no evitando que vuelque si la fuerza de deriva en la vela es muy elevada.

Las fuerzas de deriva y antideriva se descomponen en dos fuerzas, como se advierte en el dibujo de la derecha. Estas dos son la fuerza lateral y vertical. De igual forma, son percibidos en el dibujo los centros de esfuerzos y el ángulo de escora. Los centros de esfuerzos son importantes pues junto a,

entre otras, la fuerza de deriva y antideriva determinarán: el momento necesario para que vuelque y el ángulo de escora límite antes de que eso se produzca.

Las otras fuerzas que juegan un papel en la estabilidad del velero son el peso existente en el velero y el empuje del agua, importando también en ambas sus centros de aplicación (Figuroa, 2011). El peso existente en el velero se entiende incluyendo todo tipo de carga adicional y pasajeros.

Indicar, además, que existe una guía resumen sobre la estabilidad en barcos denominada ORC Stability & Hydrostatic Datasheet Explanation (Offshore Rating Congress, 2009).

2.4. Clase 470

El proyecto se ha realizado pensando en un modelo de velero en concreto. Este velero es la clase 470. Fue diseñado en 1963 por el francés André Cornu. En 1969 la clase fue reconocida como clase internacional y en 1976 pasó a ser clase olímpica (Pereira, 2005). Es un modelo pensado para dos personas.

Aunque en el proyecto se simulará una vela, la mayor, este barco dispone de tres velas. Estas son denominadas mayor, foque y spinnaker. Sus principales dimensiones y geometría se aprecian en la figura siguiente:



Figura 2. 11: Foto y dimensiones velero 470 (Pereira, 2005)

Existe un cuaderno técnico de la clase donde se explica la puesta a punto, cómo hacer los reglajes según el viento, posición de la tripulación... (Pereira, 2005). Además de esto, también se tienen documentos de puesta a punto de fabricantes del 470 como el de North Sails (2016).

En el proyecto se ha tomado la longitud de la cuerda de la vela mayor en su zona inferior. Esta es de dos metros y medio. Como se elige la zona inferior, la cuerda coincide con el perfil de la botavara. Aunque no comparten su longitud

total, pues la longitud de la cuerda de la vela en la botavara se ajusta con un reglaje llamado pajarín. Este reglaje permite modificar la curvatura de la vela. Ya que el velero elegido tiene muchos reglajes, los cuales permiten variar posiciones y formas de sus componentes, se ha intentado maximizar la flexibilidad en todo el proceso de generación del modelo, pensando en posibles proyectos posteriores.

Del mismo modo, la generación de la malla se ha realizado, también, pensando en la facilidad de incluir el resto de velas sin afectar demasiado al modelo.

En la figura, que se muestra a continuación, vienen dibujados los principales reglajes de la vela mayor:

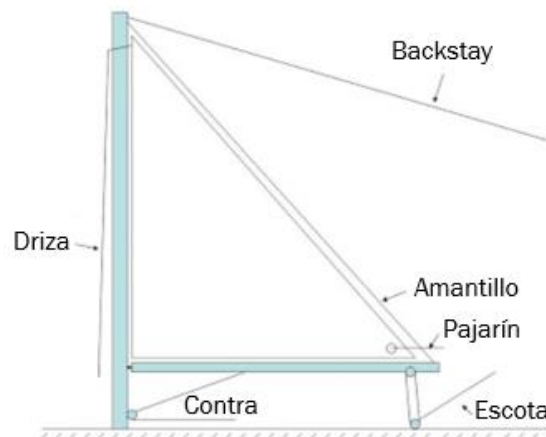


Figura 2. 12: Reglajes de la vela mayor (Kariger, 2018)

El único reglaje que se va a utilizar en el proyecto es el que permite cazar o filar la vela, variando la posición de la vela respecto al barco. Por este motivo se va a explicar brevemente cómo funciona. Se denomina escota y es un cabo, es decir una cuerda de fibras sintéticas o naturales, que sujeta la botavara. El cabo es tensado o destensado para cazar o filar la vela, pasando por un riel y varias poleas.

3. Generación del modelo

3.1. Fundamentación teórica

A continuación, se va a explicar la teoría en la que se fundamenta la generación del perfil de la vela.

Si se tiene la siguiente situación:

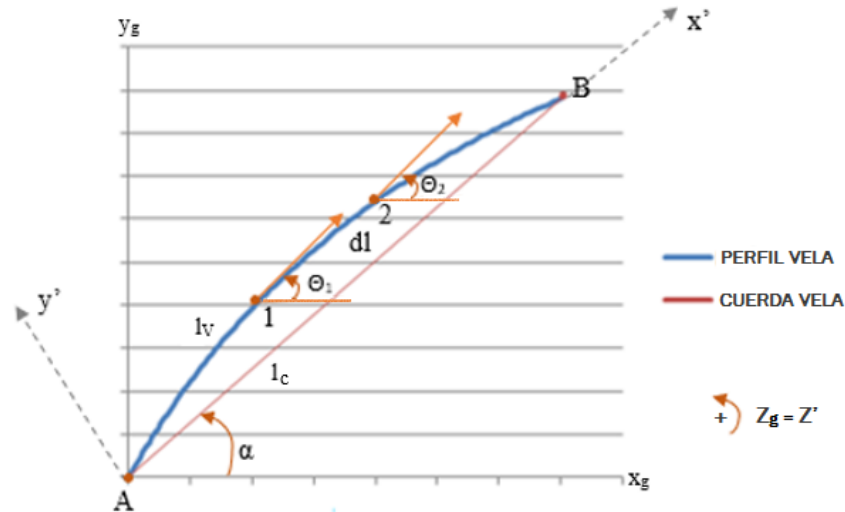


Figura 3. 1: Datos y variables en el perfil de vela.

Donde:

- 1,2: puntos intermedios del perfil de la vela separados dl_v .
- A: punto inicial del perfil de la vela.
- B: punto final del perfil de la vela.
- α : giro de la vela respecto el eje horizontal " x_g ".
- l_c : longitud de la cuerda de la vela.
- l_v : longitud del perfil de la vela.
- dl_v : diferencial de la longitud del perfil de la vela.
- θ_1 : giro de perfil de la vela en punto 1 respecto eje horizontal " x_g ".
- θ_2 : giro de perfil de la vela en punto 2 respecto eje horizontal " x_g ".

Además, existe un plano contenido en los ejes " x_g " e " y_g ", y un perfil de la vela orientado con un ángulo α variable, y coincidente con los ejes " x' " e " y' ". Dicho perfil se forma a partir de una curva delimitada por dos puntos, A y B donde:

- Punto A: punto inicial del perfil de la vela, es fijo ante el giro de la vela y es donde se establece el origen de coordenadas de los dos sistemas de referencia. Por tanto, es el punto (0,0) en ambos.
- Punto B: punto final del perfil de la vela, es móvil ante el giro de la vela en los ejes " x_g " e " y_g " y fijo respecto ejes " x' " e " y' ". Su posición, respecto a

los ejes “x_g” e “y_g”, viene determinada por el ángulo de la vela y la longitud de la cuerda a partir de la siguiente expresión:

$$x_B = l_C \cdot \cos \alpha \quad (3.1)$$

$$y_B = l_C \cdot \sin \alpha \quad (3.2)$$

Respecto a los ejes “x’” e “y’” es fijo y vale siempre $(x', y') = (2,5; 0)$.

Ahora que ya se ha definido la posición inicial y final del perfil de la vela, hay que plantear las ecuaciones que dan las posiciones intermedias, es decir, su curvatura, de una forma sencilla.

La diferencia de ángulos entre dos posiciones intermedias, puntos 1 y 2, separados dl_v , con ángulos de curvatura θ_1 y θ_2 , dependerá de dos variables, como son la presión del viento en la vela y la tensión en la misma. Siendo:

- Presión ($P(l_v)$): perpendicular al perfil de la vela en cada punto. Con valor variable dependiendo de la longitud de la vela (l_v).
- Tensión (T): paralela al perfil de la vela en cada punto, trabajando a tracción. Con valor constante a lo largo del perfil de la vela.

De las dos variables expuestas anteriormente, la tensión ya es una fuerza, pero la presión es una fuerza por unidad de superficie. En esta ocasión, como se trabaja en dos dimensiones, la fuerza se calcula por unidad de longitud y por un metro de altura. Hay que integrar la presión a lo largo del perfil de la vela para sacar la fuerza en el perfil. Esa es la fuerza de presión (F_P):

$$F_P = \int_0^{l_v} P(l_v) \cdot dl_v \quad (3.3)$$

Por tanto, se dibuja las fuerzas entre los puntos, separados un dl_v , puntos 1 y 2. Los ejes de la figura están orientados de forma que, la fuerza resultante de las presiones entre esos puntos, por simplificar, es perpendicular al eje “x”. Se tiene:

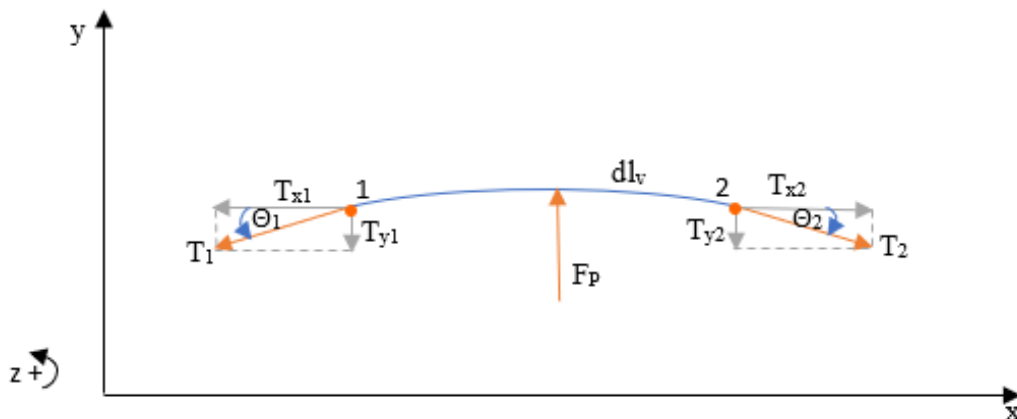


Figura 3. 2: Fuerzas en el perfil de la vela.

Aplicando estática, ya que el perfil de la vela no se mueve (González, 2001, p. 21):

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (3.4)$$

De ahí:

$$\sum F_x = 0 ; T_{x2} - T_{x1} = 0 ; T_{x2} = T_{x1}; \quad (3.5)$$

$$\sum F_y = 0 ; F_P - T_{y1} - T_{y2} = 0 ; F_P = T_{y1} + T_{y2}; F_P = T_1 \sin \theta_1 + T_2 \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

Como están separados un dl_v , los ángulos θ_1 y θ_2 son muy pequeños, entonces:

- $\sin(\theta_1) \approx \theta_1$
- $\sin(\theta_2) \approx \theta_2$

Tras lo anterior, definiendo $T_1 = T_2 = T = cte$, se llega a:

$$F_P = 2 \cdot T \cdot \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2} \quad (3.7)$$

De nuevo, al estar separados un dl_v , entre θ_1 y θ_2 hay un diferencial de ángulo $d\theta$. Además, según están definidos los ángulos, θ_2 es negativo:

$$-d\theta \approx -\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (3.8)$$

Definiéndose la fuerza de presión según la ecuación 3.3, de donde:

$$dF_P = P(l_v) \cdot dl_v \quad (3.9)$$

Por tanto, sustituyendo y ordenando la ecuación se llega a:

$$\frac{d\theta}{dl_v} = -\frac{P(l_v)}{2 \cdot T} \quad (3.10)$$

3.2. Modelo en Excel

Para calcular el perfil de la vela usando la ecuación 3.10, se creó una macro en Excel 2016 cuyo resultado es el perfil de la vela a través de 101 puntos (del punto 0 al 100), es decir, unos 100 tramos.

Esta macro permite, además, calcular el perfil para cualquier situación de ángulo de giro de la vela, longitud de la vela y longitud de su cuerda, a través de la modificación de los siguientes datos:

DATOS	
LongCuerda (L_c) (m)	2,5
LongVela (L_v) (m)	2,55
ΔL (mm)	25,5
Ang giroVela (α) ($^\circ$)	45

Tabla 3. 1: Datos iniciales macro Excel

Donde ΔL se define como:

$$\Delta L(mm) = \frac{L_V \cdot 10^3}{n^\circ \text{ tramos vela}} \quad (3. 11)$$

El ángulo de giro de la vela se creó con el objetivo de poder girar la vela manteniendo el ángulo de entrada de aire al modelo constante. Como se verá más adelante este ángulo no se ha usado, debido a que se optó por hacer lo inverso. En cualquier caso, no se ha eliminado porque puede ser útil en posibles futuros proyectos, cuando se añada otra vela al modelo. De esta manera es posible simular distintas posiciones relativas entre las velas.

Con los datos anteriores es posible calcular el punto final del perfil. Además, uniendo el punto final y el inicial del perfil se tiene la cuerda de la vela:

Cuerda Vela		
	Punto inicial	Punto final
Coord x (m)	0	1,768
Coord y (m)	0	1,768

Tabla 3. 2: Cuerda del perfil de la vela

Definiéndose como:

- X_{inicial} , en metros: posición inicial en el eje “X” del perfil de la vela. Coincide con el origen de coordenadas del modelo en Excel. Es un punto fijo.
- Y_{inicial} , en metros: posición inicial en el eje “Y” del perfil de la vela. Coincide con el origen de coordenadas del modelo en Excel. Es un punto fijo.
- X_{final} , en metros: posición final en el eje “X” del perfil de la vela. La posición del punto varía con la siguiente ecuación:

$$X_{\text{final}} = L_C \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right) \quad (3. 12)$$

- Y_{final} , en metros: posición final en el eje “Y” del perfil de la vela. La posición del punto varía con la siguiente ecuación:

$$Y_{\text{final}} = L_C \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right) \quad (3. 13)$$

Para cada punto se define una longitud “L”, presión “P”, ángulo “ θ ”, posición “X” y posición “Y”, como se ve en la siguiente imagen:

Punto	L(m)	Presión (Pa)	θ (rad)	X(m)	Y(m)
0	0	100	0,341	0	0
1	0,0255	100	0,334	0,011	0,023
2	0,051	100	0,327	0,022	0,046
3	0,0765	100	0,320	0,033	0,069
4	0,102	100	0,313	0,045	0,092

Tabla 3. 3: Valores por puntos macro Excel

Donde los datos obtenidos se definen y calculan de la siguiente forma:

- Longitud (L), en metros: es la longitud que tiene el perfil de la vela desde el punto inicial hasta ese punto.

$$L_i(m) = L_{i-1} + \frac{\Delta L}{10^3} \quad (3.14)$$

- Presión (P), en pascales: presión en el perfil de la vela en cada punto. Definida para un primer modelo como constante, con un valor de 100 Pa. La idea es que, en trabajos posteriores, se obtenga de Fluent los valores de la presión en cada punto, con ello, volver a calcular el nuevo perfil y continuar así la iteración con Fluent. Consiguiendo, de esta manera, un perfil de la vela con forma más realista, lo que generará modelos más exactos.
- Tita (θ), en radianes: es el ángulo del perfil de la vela en cada punto respecto de su cuerda.

$$\theta_i(rad) = \theta_{i-1} + \frac{P_i(L)}{2 \cdot T} \cdot \frac{\Delta L}{10^3} \quad (3.15)$$

Donde T es la tensión en el perfil de la vela.

- Posición X, en metros: es la posición en el eje "X" del perfil de la vela en cada punto.

$$X_i(m) = X_{i-1} + \frac{\Delta L}{10^3} \cdot \left[\cos \theta_i \cdot \cos \left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360} \right) - \sin \theta_i \cdot \sin \left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360} \right) \right] \quad (3.16)$$

- Posición Y, en metros: es la posición en el eje "Y" del perfil de la vela en cada punto.

$$Y_i(m) = Y_{i-1} + \frac{\Delta L}{10^3} \cdot \left[\cos \theta_i \cdot \sin \left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360} \right) + \sin \theta_i \cdot \cos \left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360} \right) \right] \quad (3.17)$$

Los valores de la tensión T y del ángulo θ_0 , varían para cada longitud del perfil de la vela y presión, como se ve en la fórmula 3.10. Ahí es donde entra en juego la macro.

Lo que hace simplemente es copiar, los valores de tensión y θ_0 , desde "valor anterior" a "valor nuevo", cien veces. Esto sucede al pulsar el botón ejecutar.

VALORES A CALCULAR		
Tensión (N/m)	185,30	VALOR
θ_0 (°)	19,91	NUEVO
Tensión (N/m)	185,30	VALOR
θ_0 (°)	19,91	ANTERIOR

EJECUTAR

Tabla 3. 4: Valores de tensión y θ_0 en macro Excel

Las celdas con el valor de la tensión y θ_0 de "valor nuevo", no tienen ninguna fórmula asociada. Para ello, se tendrá que introducir unos valores iniciales antes de ejecutar la macro.

Las celdas con el valor de la tensión y θ_0 de “valor anterior”, tienen las siguientes fórmulas asociadas:

$$T_{anterior}(N/m) = T_{nueva} - Error\ en\ X \cdot 100 \quad (3.18)$$

$$\theta_{0\ anterior}(\text{º}) = \theta_{0\ nueva} - Error\ en\ Y \cdot 30 \quad (3.19)$$

Siendo “Error en X” y “Error en Y”:

ϵ_{abs} pto final	
Error en X (m)	0
Error en Y (m)	0

Tabla 3. 5: Error absoluto punto final

$$Error\ en\ X(m) = X_{100} - X_{final} = X_{100} - L_C \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right) \quad (3.20)$$

$$Error\ en\ Y(m) = Y_{100} - Y_{final} = Y_{100} - L_C \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right) \quad (3.21)$$

También se creó un gráfico para visualizar la representación:

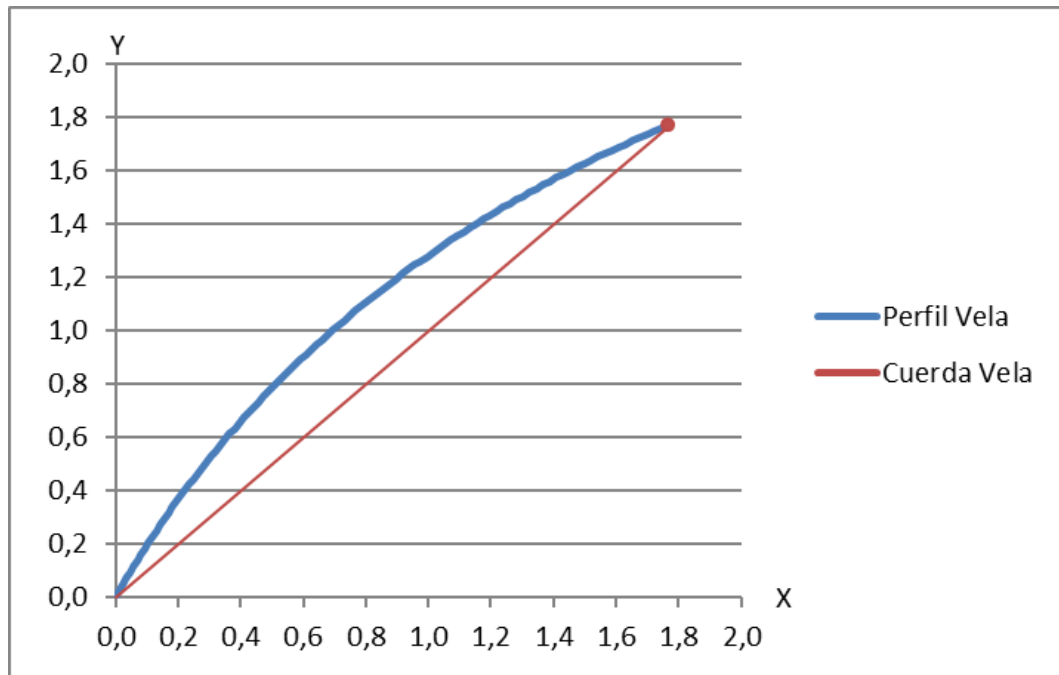
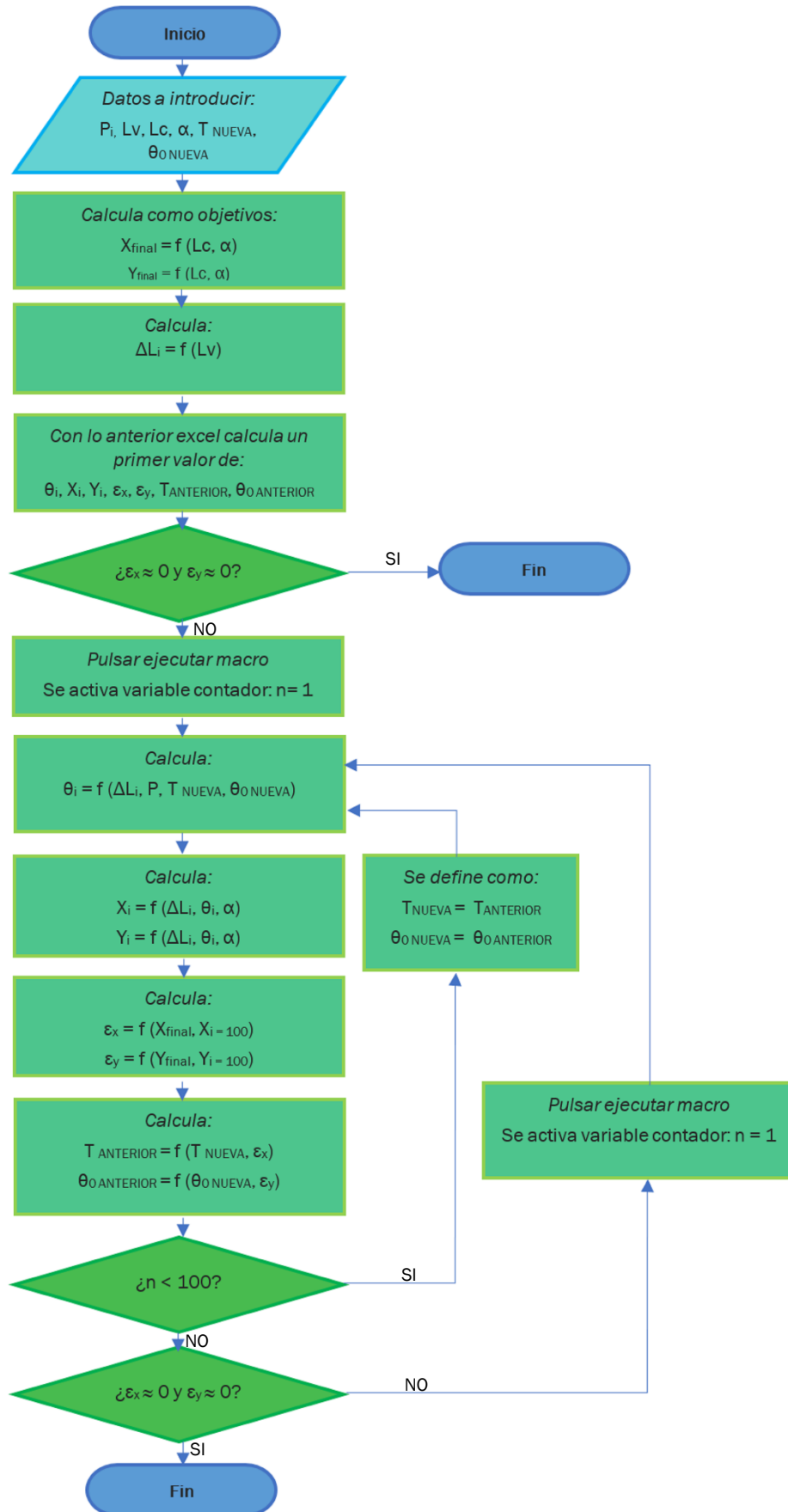


Figura 3. 3: Gráfico del perfil de la vela y su cuerda en macro Excel

Para facilitar el entendimiento del proceso que sigue la macro, se ha creado un flujograma representando el funcionamiento de la hoja Excel:



3.3. Modelo en Catia

Para generar el dominio CFD del modelo se recurre a Catia, versión V5R21. Lo primero que se hace, es crear un sketch del perfil de la vela, llamado “Perfil vela”, mediante una spline con los 101 puntos del perfil de la vela.

En esa spline, se crean unas cotas geométricas “X” e “Y”, las cuales están parametrizadas, creando el punto inicial de la spline en el $(X_i, Y_i, 0)$, donde “X_i” e “Y_i” son parámetros. Como valores iniciales, se tomó X_i = 50 m e Y_i = 50 m, para evitar que haya problemas con los valores negativos en las cotas del perfil de la vela al girarla.

La fórmula para cada cota “X_{n cota}” e “Y_{n cota}” del perfil de la vela, son del tipo:

$$X_{n \text{ cota}} = X_i + X_{n \text{ excel}} \quad (3. 22)$$

$$Y_{n \text{ cota}} = Y_i + Y_{n \text{ excel}} \quad (3. 23)$$

Variando n de 0 a 100, correspondiendo a cada punto del perfil de la vela. Siendo:

- X_{n cota}: valor en el eje “X” de la cota en Catia del perfil de la vela en cada punto.
- Y_{n cota}: valor en el eje “Y” de la cota en Catia del perfil de la vela en cada punto.
- X_{n excel}: valor en el eje “X” de la cota en Excel del perfil de la vela en cada punto.
- Y_{n excel}: valor en el eje “Y” de la cota en Excel del perfil de la vela en cada punto.

Los parámetros “X_{n Excel}” e “Y_{n Excel}”, hacen referencia a una hoja Excel llamada: “Parámetros Perfil Vela”. En dicha hoja, se han copiado en una tabla los valores obtenidos, en la macro del perfil de la vela, de todos los puntos del perfil de la vela en los ejes “X” e “Y”. Todo ello para distintas configuraciones de ángulos, longitudes de cuerda y perfil de presiones en el perfil de la vela. Esta tabla es ampliable con la configuración que se requiera, teniendo el siguiente formato:

Nº	ÁNGULO	LONG CUERDA	PRESIÓN	0 X	1 X	2 X
1	0º	2,5	P0	0,000	0,024	0,048
2	30º	2,5	P0	0,000	0,017	0,033
3	45º	2,5	P0	0,000	0,011	0,022
4	60º	2,5	P0	0,000	0,005	0,009
5	90º	2,5	P0	0,000	-0,009	-0,017
6	135º	2,5	P0	0,000	-0,023	-0,046
7	180º	2,5	P0	0,000	-0,024	-0,048
8	215º	2,5	P0	0,000	-0,015	-0,030
9	270º	2,5	P0	0,000	0,009	0,017
10	315º	2,5	P0	0,000	0,023	0,046

Tabla 3. 6: Valores de los puntos del perfil de la vela según configuración

Donde el ángulo viene especificado en grados, la longitud de la cuerda de la vela y de cada punto en metros, y la presión con un código del tipo P0, P1... Los valores de presión en cada punto están especificados en otra hoja excel llamada: "Perfil de presiones vela", dicha hoja sigue el siguiente formato:

PRESIÓN(Pa)	Pto 0	Pto 1	Pto 2
P0	100	100	100

Tabla 3. 7: Valores de presión en cada punto del perfil de la vela

Posteriormente, se crea un sketch llamado "Dominio CFD", con origen en un nuevo sistema de coordenadas parametrizado situado en el punto (Xi, Yi, 0), es decir, en el origen del perfil de la vela. Sirve para definir los límites externos del dominio CFD. Para ello, se genera un círculo de 350 metros de radio. Seguidamente se extruye simétricamente en torno al eje "Z", unos 200 milímetros, con un pad llamado "Pad dominio CFD".

Aunque este dominio pueda parecer muy grande, se prefiere que sea así para que los contornos no influyan en la solución y se asegure la convergencia. Más tarde, ya se asegurará que esta decisión no incremente demasiado el coste computacional.

Ahora, se necesita crear el hueco que genera el perfil de la vela en el dominio. Debido a ello se hace un sketch rectangular, centrado en el origen del perfil de la vela, de 2 mm de ancho y 400 mm de altura, llamado "Perfil Slot Vela". Además, se realiza un slot, llamado "Slot hueco vela", tomando como perfil "Perfil Slot Vela" y como curva central "Perfil vela".

Con todo esto se crea un árbol de operaciones y un dominio CFD que tiene la siguiente forma:



Figura 3. 4: Árbol de operaciones en Catia

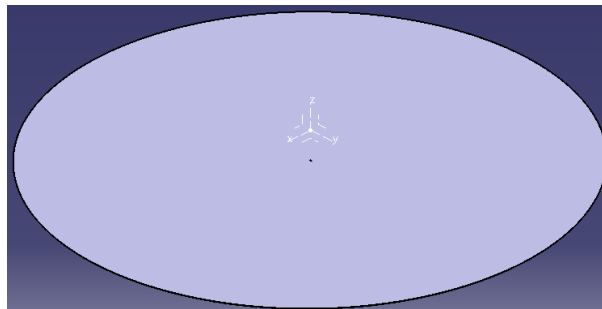


Figura 3. 5: Dominio CFD en Catia



Figura 3. 6: Perfil de la vela a $\alpha=90^\circ$ en Catia

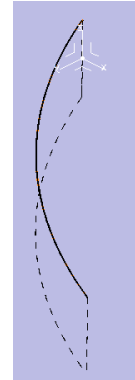


Figura 3. 7: Perfil de la vela a $\alpha=45^\circ$ en Catia

3.4. Generación de la malla

3.4.1. Modelo en DesignModeler

Para generar la malla, se importa el modelo creado en Catia a Ansys 17.0, donde se realizará el resto del proceso. Lo primero que se tiene que hacer es crear un nuevo Workbench. En dicho programa, se creará un sistema de análisis de tipo “Fluid Flow (Fluent)” desde donde se organiza todo el proceso.

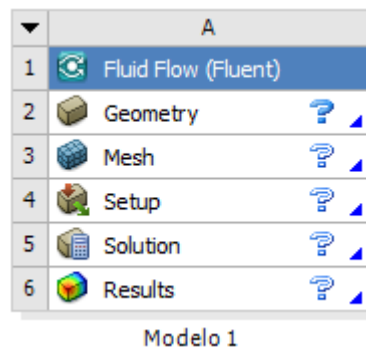


Figura 3. 8: Workbench del modelo

Este sistema de análisis, como se ve en la foto anterior, consta de varios procesos ordenados de forma descendente. En el proceso se tendrán que usar varios programas. El primero de todos es de CAD, el DesignModeler.

Lo que se hace es, desde el propio Workbench, importar la geometría de Catia. Una vez hecho esto, se entra en el DesignModeler y se genera la geometría importada.

Ahora se realiza la operación “Midsurface”, para convertir el sólido 3D en una superficie 2D. Además, se define la superficie creada como superficie fluida de espesor nulo.

Después, se crea un sketch para generar los ejes necesarios que separen las caras del dominio fluido. Esas caras y ejes van a servir más adelante para controlar el mallado.

Para crearlo, se construye un círculo de diez metros centrado en el origen del perfil de la vela. Posteriormente dos líneas verticales, una en dirección del eje “Y” positivo y otra en el negativo, a la altura del origen del perfil de la vela. Dichas líneas comprenden desde el exterior del círculo de diez metros, hasta el extremo del dominio CFD. Una vez hecho esto, se aplica un “Face Split”, para formar tres caras en el dominio fluido.

Por último, se emplea un “Edge Split” a los dos bordes exteriores existentes en el dominio CFD. Separando cada uno en 72 ejes, en total 144, equivaliendo, en grados, a un eje cada 2,5°. Esto permitirá poder orientar las condiciones de contorno de entrada y salida del dominio, pudiéndose delimitar cada 2,5° sin necesidad de volver a mallar.

El árbol de operaciones y la geometría generada queda de la siguiente manera:

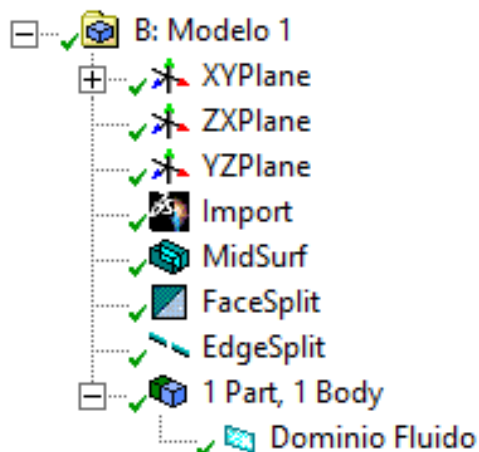


Figura 3. 9: Árbol de operaciones DesignModeler

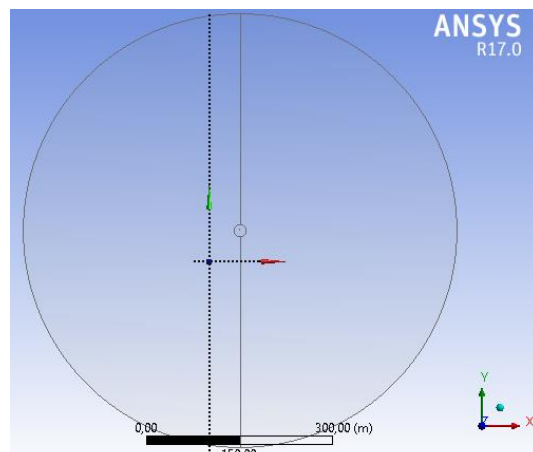


Figura 3. 10: Dominio CFD en DesignModeler

3.4.2. Modelo en Meshing

A continuación, se pasa el modelo al programa Meshing, donde se hará el mallado.

Para obtener el mallado final se ha seguido los consejos de Tizón (2008). Con ese objetivo se realizan una serie de operaciones, las cuales son:

- Mapeado círculo mayor: es un mapeado a las dos caras exteriores del dominio CFD, permitiendo crear un mallado simétrico y más ordenado en estas dos caras.
- Face Sizing círculo menor: posibilita crear un tamaño de elemento en la cara perteneciente al círculo de 10 metros de radio. En este primer modelo dicho tamaño es de 0,2 metros.

- Edge Sizing perfil vela: da el tamaño a las celdas en contacto con el perfil de la vela. Esto permite capturar el hueco generado por el perfil de la vela en el dominio. El tamaño de elemento está definido como la mitad de la anchura del perfil de la vela, es decir, un milímetro.
- Edge Sizing ejes verticales: da el tamaño a las celdas en contacto con las líneas verticales que separan las dos caras exteriores del dominio. Permite, además, controlar el tamaño de las celdas generadas en la operación “Mapeado círculo mayor”. Al elegir la opción “Hard” en “Edge Sizing ejes verticales”, en vez de “Soft”, se consigue que el tamaño de las celdas se mantenga a lo largo de las caras exteriores, dominadas por la mencionada operación de mapeado. Como se desea que, según se aleje del perfil de la vela, el tamaño de las celdas aumente, el eje tiene un “Bias Factor” con un factor de crecimiento de trescientos. Para que la relación de aspecto no sea grande, se ha tomado como tamaño del primer elemento 0,2 metros. Por tanto, se divide en treinta tramos cada eje, calculado gracias al Excel de CFDNINJA (2017).
- Inflation círculo menor: se usa esta operación porque, a pesar de que se ha tomado un tamaño de primer elemento en la operación “Edge Sizing ejes verticales”, aún la relación de aspecto es mejorable entre la cara interior y las exteriores. Se aplica a la cara del círculo pequeño, diciendo que, en su borde exterior, las celdas crezcan a razón de uno y medio, durante dos celdas.
- Edge Sizing borde exterior del dominio: da el tamaño a las celdas en contacto con el borde exterior del dominio. Posibilita, además, controlar el tamaño de las celdas generadas en la operación “Mapeado círculo mayor”. Como se ha partido el borde externo en 144 ejes, al menos serán 144 las celdas en contacto con el borde exterior. Ya que, se considera ese número suficiente, cada eje pertenecerá a una celda, asegurando de esta forma, su número y su distribución simétrica.
- Edge Sizing anchura perfil vela: da el tamaño a las celdas en contacto con los bordes que forman la anchura en el perfil de la vela. Simplemente, se controla que cada una se divida en dos elementos. Si no se hace de esta manera, se dividen sólo en uno, quedando celdas con mala relación de aspecto, situación que, estando en contacto con el perfil de la vela, se prefirió evitar.
- Inflation perfil vela: sirve para tener una anchura pequeña en las celdas en contacto con el perfil. Así se tendrá más precisión en los valores calculados en torno al perfil. Para aplicarlo, se modifica la cara del círculo pequeño, fijando que, en los ejes en contacto con el perfil de la vela, con la opción de transición suave seleccionada, las celdas crezcan a razón de 1,2, durante dos celdas.

Además, se ha generado tres “Named Selections”, que son:

- Entrada: comprendida por la mitad de los bordes exteriores. Son por los cuales viene el aire al dominio, dependiendo, por tanto, de la dirección de éste. En este caso, como el aire viene por la derecha, será la mitad derecha de los bordes del dominio.
- Salida: comprendida por la otra mitad de los bordes exteriores. Son por los cuales se va el aire del dominio, dependiendo, por tanto, de la dirección de éste. En este caso, como el aire se va por la izquierda, será la mitad izquierda de los bordes del dominio.
- Perfil vela: son los cuatro bordes que comprenden el perfil de la vela.

Con todo esto, el árbol de operaciones queda, como se puede ver en las imágenes mostradas a continuación:

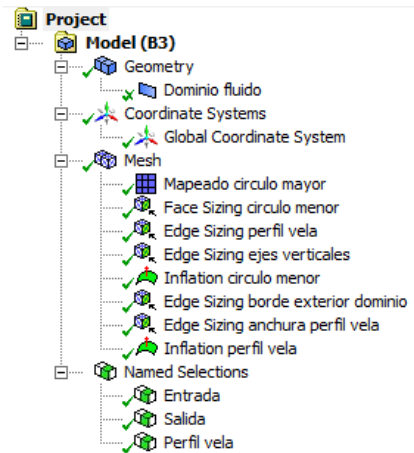


Figura 3. 11: Árbol de operaciones en Meshing

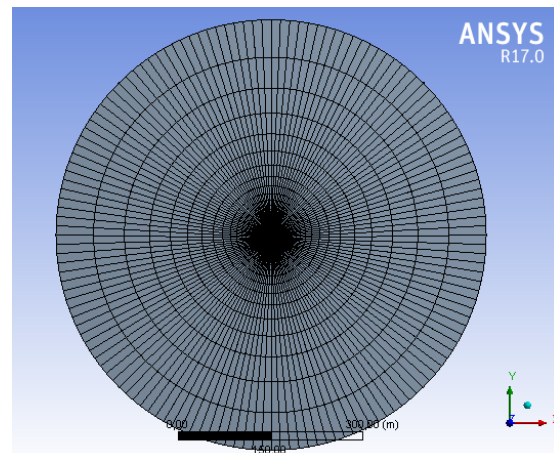


Figura 3. 12: Mallado en Dominio CFD

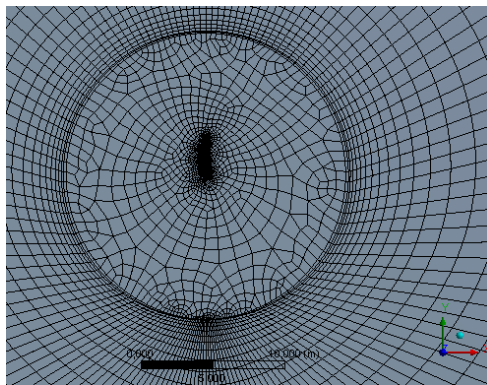


Figura 3. 13: Mallado en la cara perteneciente al perfil de la vela y proximidades

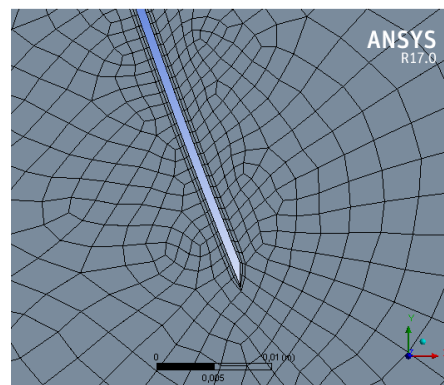


Figura 3. 14: Mallado alrededor del perfil de la vela

3.5. Modelo en Fluent

Una vez hecho lo anterior, se pasa al modelo en Fluent, programa donde se va a resolver el modelo. El flujo es calculado con un solucionador basado en presión, estacionario, con la velocidad formulada en valor absoluto y en 2D. El sistema de ejes utilizado en Fluent es el mismo que el de Meshing. La realización de este apartado se ha apoyado en el tutorial de Fluent (Swanson Analysis Systems, Inc., 2015) y en de Pieri (2016).

3.5.1. Tipo de flujo

El fluido a simular es el aire, con una densidad y viscosidad constante. Esto es debido a que es la opción más sencilla, por tanto, con menos peso de cálculo, resultando para nuestro modelo una aproximación suficientemente buena. Los valores de densidad y viscosidad son los siguientes:

- Densidad: $\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$.
- Viscosidad: $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/(m}\cdot\text{s)}$.

El tipo de flujo es un motivo por el cual se elige el solucionador basado en presión (ANSYS, Inc., 2015)¹, además de la selección hecha por de Pieri (2016) y el modelo viscoso seleccionado más adelante.

3.5.2. Valores de referencia

Los valores de referencia son usados por el modelo para calcular los valores del postprocesado (ANSYS, Inc., 2015)¹. De ellos, los que pueden llegar a interesar, se han definido como:

- Densidad: $\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$.
- Viscosidad: $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/(m}\cdot\text{s)}$.
- Velocidad: $v = 5,144444 \text{ m/s} = 10 \text{ nudos}$.
- Presión manométrica: $P_{\text{man}} = 0 \text{ Pa}$.
- Profundidad: $h = 1 \text{ m}$.
- Área de referencia: $A = 2,5 \text{ m}$.

Dentro de las variables anteriores comentar que, al ser una simulación en 2D con profundidad de referencia de un metro, todas las fuerzas calculadas deben entenderse por metro de altura (ANSYS, Inc., 2015)². Además, indicar que el área de referencia se obtiene de:

$$A = h \cdot c \quad (3.24)$$

¹ Fluent User's Guide, apartado 33.12. Reference Values.

² Fluent Theory Guide, apartado 23.2.1. Computing Forces, Moments, and the Center of Pressure.

Siendo:

- h: profundidad, en este caso $h = \text{cte} = 1 \text{ m}$.
- c: cuerda del perfil de la vela o longitud de la botavara.

3.5.3. Condiciones de contorno

Son las siguientes:

- Dominio fluido (interior-dominio_fluido): son todas las celdas interiores que forman el dominio. Se define como tipo interior, por lo que no interfieren en el flujo.
- Ejes sketch(dominio_fluido): son los bordes que se crearon en DesignModeler para controlar el mallado. Se define como tipo interior, por lo que no interfieren en el flujo.
- Entrada (entrada): está definida como una condición “velocity-inlet”. Con una magnitud de velocidad de entrada fija de $5,144444 \text{ m/s}$, es decir, diez nudos. La dirección del flujo, respecto a los ejes fijos “X” e “Y”, será variable según el ángulo de entrada del aire (α_a). En este caso, será $(X, Y) = (-1, 0)$. También añadir que, para asegurar la convergencia (de Pieri, 2016), el modo de turbulencia especificado es intensidad y longitud de la escala, con una intensidad de 5% y una longitud de 1 m.
- Salida (salida): está definida como una condición “pressure-outlet”. Con una magnitud de presión manométrica fija de 0 Pa. Una vez más explicar que, para asegurar la convergencia (de Pieri, 2016), el modo de turbulencia especificado es intensidad y longitud de la escala, con intensidad de 5% y longitud de 1 m.
- Perfil de la vela (perfil_vela): está definida como una condición de “Wall” (pared), estacionaria y sin deslizamiento. Ya que, lo que se quiere simular es la existencia de un sólido fijo, como es la vela.

3.5.4. Turbulencia

3.5.4.1. Reynolds

Se quiere saber si se tiene turbulencia completamente desarrollada en el modelo. Para el caso de flujo externo alrededor de un obstáculo, escenario en el cual estamos, es lo mismo decir que el $Re \geq 2 \cdot 10^4$, aproximadamente (Parra, 2013)³. Teniendo en cuenta que, para este caso, la longitud característica es la cuerda del perfil de la vela, se calcula el Re:

³ Lección IV: Implementación de las Condiciones de Contorno, transparencia 25.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 5,144444 \cdot 2,5}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 8,80455 \cdot 10^5 \quad (3.25)$$

Ya que, $Re \geq 2 \cdot 10^4$, se concluye que el flujo es turbulento completamente desarrollado.

3.5.4.2. Modelo de turbulencia

Como se ha visto anteriormente, se asume un régimen turbulento completamente desarrollado, por lo que, de todos los modelos viscosos existentes, se tendrá que utilizar uno que sea turbulento.

Por disminuir el tiempo de cálculo, ya que el modelo está pensado para poder hacer muchas simulaciones, se ha elegido el modelo turbulento más sencillo. El modelo seleccionado es, por tanto, el Spalart-Allmaras, basado en vorticidad. Éste es suficientemente preciso para lo que se quiere abordar (ANSYS, Inc., 2015)⁴.

3.5.5. Algoritmo de resolución

Para la selección del algoritmo de resolución se ha intentado también, en primera instancia, no incrementar mucho el coste computacional. El esquema elegido para la resolución, ya que el simple no convergía correctamente, fue el esquema acoplado (de Pieri, 2016). El resto de opciones se ha dejado como viene por defecto, ya que lo asignado es suficiente.

3.5.6. Sensibilidad de malla

Una vez decidido lo anterior, se simula el modelo, obteniendo unos resultados que más tarde se tienen que validar. Lo primero es hacer un análisis de sensibilidad de malla, para validar la malla. La siguiente tabla, resume las principales características para elegir el modelo de malla:

Malla	Calid. Elem.	Celdas	Iteraciones	Residual masa	Fx (N)	Fy (N)
Modelo 1	0,70352	56967	650	1,40E-14	-68,25	0,019
Modelo 2	0,87555	106218	3550	1,70E-08	-72,12	0,030
Modelo 3	0,89972	143230	6100	4,00E-08	-72,28	0,036

Tabla 3. 8: Valores por modelo con sus principales características para elegir malla

Entendiéndose como:

- Calidad de los elementos: dato referido a la calidad media de los elementos, es decir, cómo se parecen las celdas de media a un cuadrado o triángulo equilátero. Cuanto más cercano a uno, más se parecen

⁴ Fluent User's Guide, apartado 12.2.1.1. Spalart-Allmaras One-Equation Model.

(ANSYS, Inc., 2015)⁵. Concretar que, el aumento de la calidad de los elementos, del modelo dos y tres respecto al uno, es, en gran parte, debido a que en el interior del círculo (de radio diez metros) las celdas pasan de ser cuadriláteros a triángulos. Esto implica, pasar en esa zona, de un mallado estructurado, a uno que no lo es, pero como la dirección del aire va ir variando, no es una mala opción (Cases, 2014, p. 43).

- Celdas: el número de celdas de cada modelo.
- Iteraciones: iteraciones hasta que el C_D y C_L y, por tanto, las fuerzas, converjan totalmente. Se hace teniendo en cuenta que, ya se tienen residuales de masa muy pequeños (ANSYS, Inc., 2015)⁶. Los residuales, en algún caso, seguían disminuyendo algo más, especialmente en los modelos dos y tres.
- Residual de masa: el residual de masa obtenido al número de iteraciones antes indicado.
- F_x : la fuerza en dirección del eje “X” positivo según Fluent, por metro de profundidad. Está expresada en Newtons.
- F_y : la fuerza en dirección del eje “Y” positivo según Fluent, por metro de profundidad. Está expresada en Newtons.

Tras ver los resultados obtenidos, el modelo elegido definitivamente es el modelo dos. Como todos tienen una buena convergencia, la elección del mismo ha sido llevada a cabo por compromiso entre tiempo de cálculo y precisión.

Dado que, apenas existen cambios significativos en los valores de fuerza entre el modelo dos y tres, sí habiéndolo en tiempo de cálculo, se ha elegido el anteriormente mencionado. El modelo uno cambia significativamente respecto al dos, al menos en cuanto a los valores de fuerza calculados, por lo que se descartó.

Las operaciones realizadas son las mismas en todos los modelos. La diferencia es el tamaño de las celdas definido en algunas de ellas, es decir, cómo están de refinadas.

A continuación, se muestran las variaciones respecto al modelo explicado en generación de la malla (el modelo uno):

- Modelo 2: en la operación llamada “Face Sizing círculo menor”, se ha reducido el tamaño de elemento a 0,15 m. En la llamada “Edge Sizing ejes verticales”, se ha hecho el cálculo para que el primer elemento del eje tenga un tamaño de 0,15 m, por lo que el borde se divide, en esta ocasión, en 41 elementos.
- Modelo 3: en la operación llamada “Face Sizing círculo menor”, se ha reducido el tamaño de elemento a 0,1 m. En la llamada “Edge Sizing ejes

⁵ Meshing User’s Guide, apartado Element Quality (Global Mesh Controls -> Statistics Group -> Mesh Metric -> Element Quality).

⁶ Fluent User’s Guide, apartado 29.15.3. Monitoring Force and Moment Coefficients.

verticales”, se ha hecho el cálculo para que el primer elemento del eje tenga un tamaño de 0,1 m, dividiéndose el borde ahora en 63 elementos. Aquí, se adjuntan las fotos del modelo dos, el finalmente seleccionado:

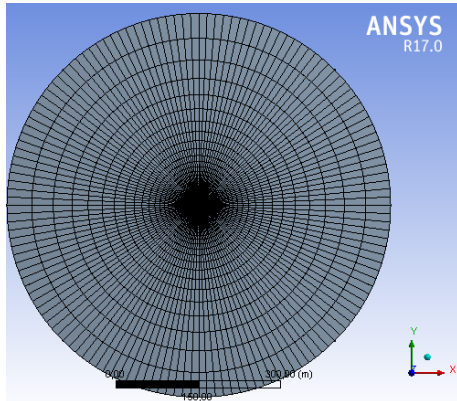


Figura 3. 15: Mallado en dominio CFD en modelo 2

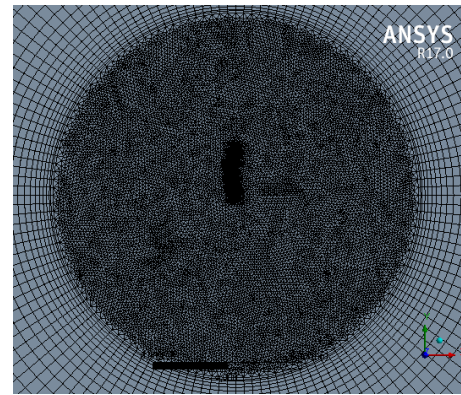


Figura 3. 16: Mallado en la cara perteneciente al perfil de la vela y proximidades en modelo 2

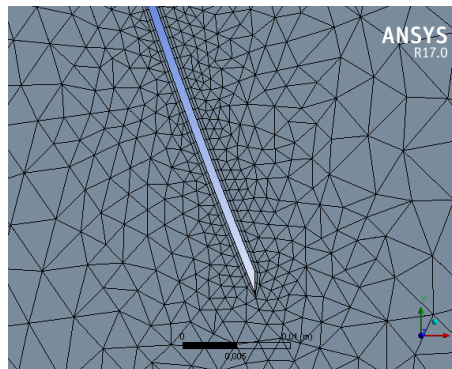


Figura 3. 17: Mallado alrededor del perfil de la vela en modelo 2

3.5.6.1. Tratamiento de pared

Para realizar este apartado es necesario simular antes el modelo, pues el valor y^+ depende de las condiciones del flujo (Lago, 2014, p. 88). A la hora de estudiarlo se utilizará el gráfico de y^+ , a lo largo del perfil de la vela, generado en dicha simulación. Este gráfico se muestra a continuación:

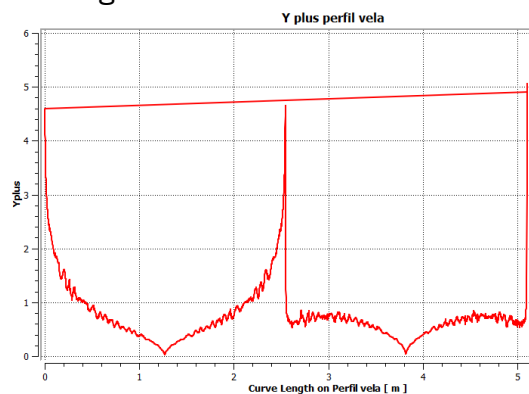


Figura 3. 18: Gráfico de Y^+ a lo largo del perfil de la vela a $\alpha_a = 90^\circ$

Tal y como se aprecia en la figura, el y^+ en el perfil es, en todo momento, inferior a cinco. Esto indica que la primera celda está dentro de la subcapa laminar, debiendo aplicar al modelo el tratamiento mejorado en la pared (Parra, 2013)⁷.

Al estar en este escenario, se está en la situación más precisa para calcular la subcapa laminar. A pesar de esto, lo óptimo para resolver la subcapa sería que $y^+ \approx 1$, valor que se cumple en gran parte de la vela, pero no en toda ella. Pero, hay que tener en cuenta que, el modelo viscoso elegido (Spalart-Allmaras) no da la posibilidad de elegir el modelo de tratamiento de pared. El Spalart-Allmaras tiene un tratamiento de paredes insensible, combinando automáticamente las variables de la solución de la formulación de la subcapa viscosa con la de capa logarítmica, dependiendo del y^+ . El modelo también está pensado para valores intermedios de y^+ , de uno a treinta. (ANSYS, Inc., 2015)⁸.

Debido a esto, el modelo tiene un buen comportamiento para los valores de y^+ con los que se está trabajando.

3.5.6.2. Re en relación con C_D

Como se expresó anteriormente en el trabajo, el Reynolds correspondiente a un flujo turbulento completamente desarrollado, para estas situaciones, es mayor o igual a, aproximadamente, $2 \cdot 10^4$ (Parra, 2013)⁹. En órdenes de magnitud, el Re del modelo no es mucho mayor. Por eso, se quiere obtener alguna evidencia más de que, el flujo, es turbulento completamente desarrollado.

Se sabe que el C_D no varía apenas con el Re en flujo turbulento completamente desarrollado (White, 2010). En ello se basará esta verificación.

El Re varía con la velocidad según la fórmula 3.23. Por esta razón, se variará la velocidad original de entrada de aire en el modelo. Ésta, es de diez nudos, unos 5,14444 m/s. Con ese fin, se simulará el modelo a dos velocidades de entrada, en un intervalo, en el cual, la velocidad original del modelo este contenida. Se ha elegido que las velocidades sean uno y diez metros por segundo.

Para este desarrollo, se denotará con el subíndice 1 al modelo con $v = 1$ m/s y con el subíndice 2 al modelo con $v = 10$ m/s. Se comprueba antes si su Re, en teoría, pertenece a flujo turbulento completamente desarrollado:

- En $v_1 = 1$ m/s: $Re_1 = \frac{\rho \cdot v_1 \cdot c}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 1 \cdot 2,5}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 1,7115 \cdot 10^5 > 2 \cdot 10^4$
- En $v_{10} = 10$ m/s: $Re_{10} = \frac{\rho \cdot v_{10} \cdot c}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 10 \cdot 2,5}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 1,7115 \cdot 10^6 > 2 \cdot 10^4$

⁷ Lección IV: Implementación de las Condiciones de Contorno, transparencia 29.

⁸ Fluent User's Guide, apartado 12.2.1.1. Spalart-Allmaras One-Equation Model.

⁹ Lección IV: Implementación de las Condiciones de Contorno, transparencia 25.

En principio, se continúa en un flujo turbulento completamente desarrollado. Simulados los dos modelos en Fluent, se llega a unas fuerzas de arrastre (F_D):

- $F_{D1} = -1,68313 \text{ N}$
- $F_{D2} = -169,025 \text{ N}$

Las fuerzas de arrastre y velocidades se relacionan, con los coeficientes de arrastre, siguiendo la siguiente fórmula:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (3. 26)$$

Entonces, si se cumple la hipótesis, $C_{D1} = C_{D2}$:

$$\frac{F_{D1}}{\frac{1}{2}\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1^2} = \frac{F_{D2}}{\frac{1}{2}\rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2^2} \quad (3. 27)$$

Como $\rho_1 = \rho_2$ y $A_1 = A_2$, simplificando y despejando, se llega a:

$$F_{D1} \cdot v_2^2 = F_{D2} \cdot v_1^2 \quad (3. 28)$$

Calculando:

- $F_{D1} \cdot v_2^2 = -168,313 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
- $F_{D2} \cdot v_1^2 = -169,025 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$

Aunque, no sean iguales, su diferencia es pequeña, menor al 1%. Entonces, se llega a la conclusión de que el Re no varía apenas con el C_D en este tramo. Es una evidencia más de que, el modelo, se encuentra en un flujo turbulento completamente desarrollado.

4. Planteamiento de las simulaciones a realizar y tratamiento de los resultados

4.1. Planteamiento de las simulaciones a realizar

Una vez seleccionado el modelo final, hay que plantear que datos se necesitan definir, que datos se quieren obtener y que simulaciones realizar para ello. En el modelo, se tiene un perfil de la vela y un ángulo del aire. Para obtener los distintos ángulos del aire respecto de la vela, se puede girar el aire y dejar la vela fija o viceversa. En este caso, se ha escogido el primer criterio. Añadir que, aun siendo dependientes, se definirán los dos ángulos.

Igualmente, la vela va colocada en el interior de un barco, el cual, tiene su orientación también. Debido a esto, se estudia a mayores el ángulo del barco. Por tanto, se tienen tres ángulos que se necesitan definir.

Además de eso, se tiene que tener presente cuál es el dato fundamental que se quiere obtener directamente de las simulaciones. Este dato son las fuerzas de la vela, por componentes “x” e “y”. Esas componentes son siempre constantes, siendo una paralela y otra perpendicular al perfil de la vela. Pero las fuerzas que realmente interesan son las fuerzas en dirección paralela y perpendicular a la del barco, las denominadas fuerzas de deriva y de avance. Por tanto, a parte de los tres ángulos mencionados anteriormente, es necesario definir: dos sistemas de coordenadas, un ángulo que las relacione y dos fuerzas para cada sistema de referencia.

Cómo se han definido y sus relaciones entre ellos se explica, a continuación, con la ayuda de la siguiente figura:

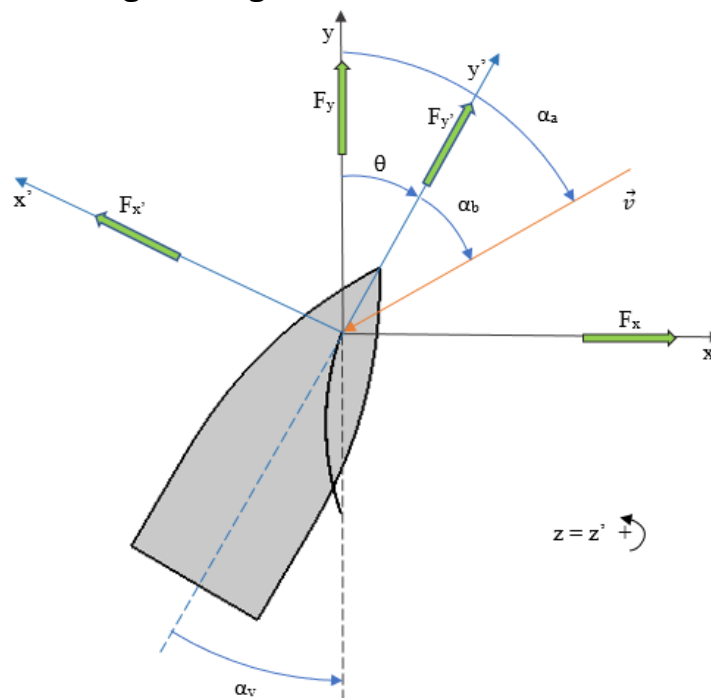


Figura 4. 1: Variables a definir del modelo

Siendo:

- (x, y, z) : sistema de coordenadas original del modelo. Sistema de referencia fijo. Este sistema coincide con el sistema de referencia de la vela, ya que la vela está fija.
- (x', y', z') : nuevo sistema de coordenadas según la orientación del barco. Sistema de referencia móvil con el barco.
- \vec{v} : vector velocidad del aire.
- θ : ángulo de cambio de coordenadas del sistema de referencia fijo al móvil.
- α_a : ángulo del aire respecto al sistema de referencia fijo o, lo que es lo mismo, ángulo del aire respecto de la vela.
- α_b : ángulo del barco respecto del aire o, lo que es lo mismo, ángulo del aire respecto al sistema de referencia móvil con el barco.
- α_v : ángulo de la vela respecto del barco. Es el inverso al ángulo de cambio de coordenadas.
- F_x : fuerza del perfil de la vela en la dirección positiva del eje “x”.
- F_y : fuerza del perfil de la vela en la dirección positiva del eje “y”.
- $F_{x'}$: fuerza del perfil de la vela en la dirección positiva del eje “x’”. Coincide con la fuerza de deriva del barco.
- $F_{y'}$: fuerza del perfil de la vela en la dirección positiva del eje “y’”. Coincide con la fuerza de avance del barco.

Las relaciones entre las variables son las siguientes:

$$x' = x_{deriva} = -x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (4. 1)$$

$$y' = y_{avance} = y \cdot \cos \theta + x \cdot \sin \theta \quad (4. 2)$$

$$F_{x'} = F_{deriva} = -F_x \cdot \cos \theta + F_y \cdot \sin \theta \quad (4. 3)$$

$$F_{y'} = F_{avance} = F_y \cdot \cos \theta + F_x \cdot \sin \theta \quad (4. 4)$$

$$\theta = \alpha_a - \alpha_b \quad (4. 5)$$

$$\alpha_v = -\theta = \alpha_b - \alpha_a \quad (4. 6)$$

El ángulo α_b , aunque podría tomar cualquier valor, dado que el barco es simétrico en torno al eje “y’”, sólo es necesario estudiarlo de 0° a 180° .

El ángulo α_a , dado que la vela es simétrica en torno al eje “x”, no es necesario estudiarlo para todos los grados. Además, como nos interesa que el barco avance hacia adelante, es decir, en dirección “y’” positiva, se reducen aún más los ángulos a estudiar. El barco irá en dirección “y’” positiva si existe una fuerza de avance positiva. Ciñéndose a las condiciones, los ángulos de aire serán los comprendidos desde 90° hasta -5° . Esto se apreciará más adelante, cuando se presenten los resultados.

Otra cosa que considerar, en cuanto al ángulo α_a , es que la vela en realidad no es rígida. La vela flameará, no manteniendo su forma original, para valores

de α_a próximos a cero grados y, por supuesto, para valores negativos. Por lo que, los valores obtenidos para estos ángulos son menos realistas.

Por último, hay que añadir que α_a es al ángulo que gobierna las simulaciones a realizar. En consecuencia, se realizarán entre los 90° y los -5° . Estas simulaciones, se espaciarán equitativamente de forma angular en primera instancia. Posteriormente, se afinará su estudio entre los ángulos considerados de más interés.

4.2. Validez de resultados

Antes de presentar los resultados, se hará una validación de los mismos para la totalidad de simulaciones realizadas en Fluent. Así, se justificará la validez de todos los datos.

Para ello, se muestra una tabla de validez de resultados. La tabla contiene, en el momento de extracción de los datos, los valores de residuales de masa y la confirmación de convergencia (o no), tanto del coeficiente de arrastre como el de sustentación. Cabe recordar que los residuales continuaban bajando en algunos de los modelos. Sin embargo, al ser ya ínfimos y tener coeficientes de arrastre y sustentación constantes, se consideró innecesario proseguir con la simulación.

α_a (°)	Residuales de masa	Convergencia C_D	Convergencia C_L
90	1,7E-08	Si	Si
80	2,80E-08	Si	Si
67,5	1,10E-08	Si	Si
55	3,00E-09	Si	Si
45	1,30E-10	Si	Si
35	1,80E-10	Si	Si
22,5	1,80E-14	Si	Si
20	1,10E-09	Si	Si
17,5	1,30E-03	No	No
15	4,80E-04	No	No
12,5	1,40E-08	Si	Si
10	1,00E-08	Si	Si
7,5	9,20E-08	Si	Si
5	8,80E-10	Si	Si
2,5	9,50E-10	Si	Si
0	5,50E-11	Si	Si
-2,5	9,60E-10	Si	Si
-5	2,10E-10	Si	Si

Tabla 4. 1: Convergencia de coeficientes y residuales de masa para cada modelo

Como se puede ver en la tabla, excepto para los valores de ángulos del aire (α_a) 15° y $17,5^\circ$, los residuales de masa son bastante bajos y los coeficientes de arrastre y sustentación convergen.

Para los ángulos de 15° y $17,5^\circ$, se tienen residuales y coeficientes periódicos. Esto se puede apreciar en las siguientes imágenes:

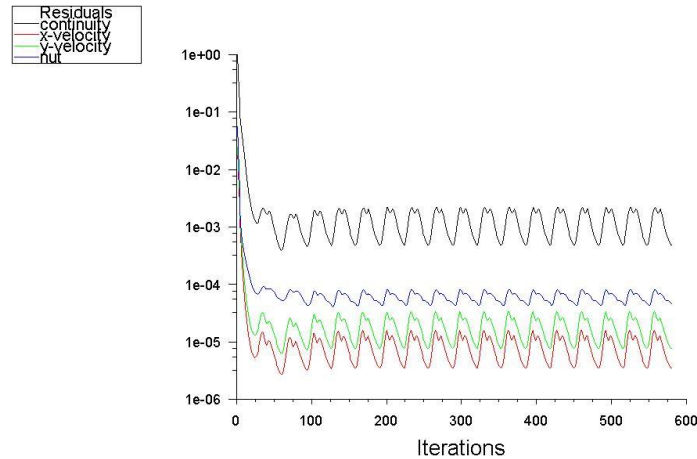


Figura 4. 2: Convergencia del residual de masa en el modelo estacionario a $\alpha_a=15^\circ$

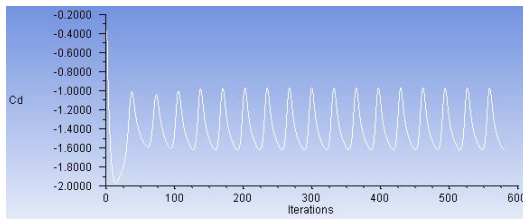


Figura 4. 3: Convergencia del coeficiente de arrastre en el modelo estacionario a $\alpha_a=15^\circ$

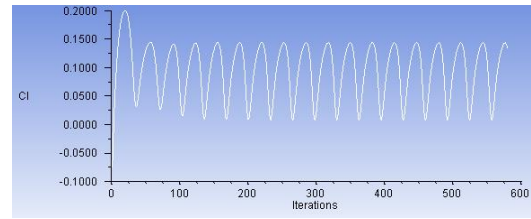


Figura 4. 4: Convergencia del coeficiente de sustentación en el modelo estacionario a $\alpha_a=15^\circ$

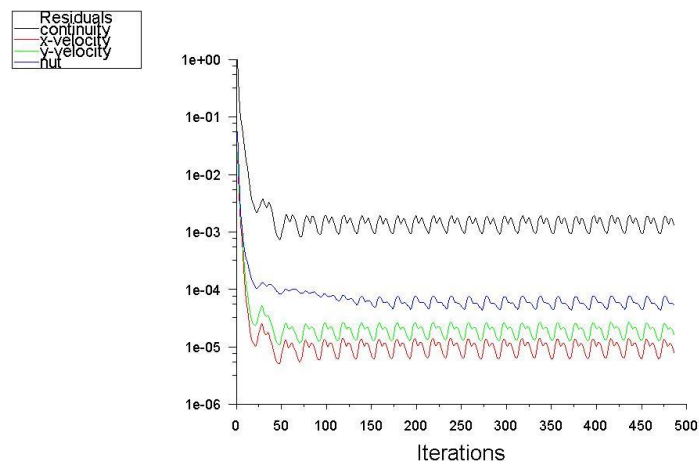


Figura 4. 5: Convergencia del residual de masa en el modelo estacionario a $\alpha_a=17,5^\circ$

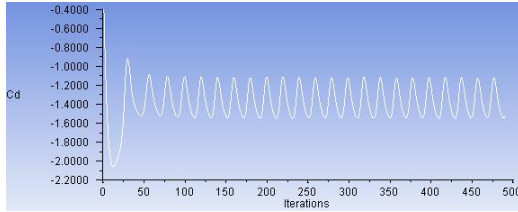


Figura 4. 6: Convergencia del coeficiente de arrastre en el modelo estacionario a $\alpha_a=17,5^\circ$

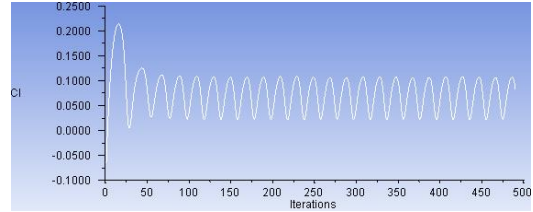


Figura 4. 7: Convergencia del coeficiente de sustentación en el modelo estacionario a $\alpha_a=17,5^\circ$

Para solucionar los resultados obtenidos (valores periódicos de los coeficientes y alto residual de masa) se simuló en transitorio, dejando todo lo demás igual. La razón de tomar esta decisión para corregirlo nace de tener coeficientes de fuerza periódicos, lo que indica unas fuerzas periódicas. Las fuerzas periódicas son debidas, previsiblemente, a desprendimientos periódicos de los torbellinos. Dado que no existe una situación estacionaria, si no transitoria, es necesario simular en transitorio para obtener unos valores realistas. Los resultados son los siguientes:

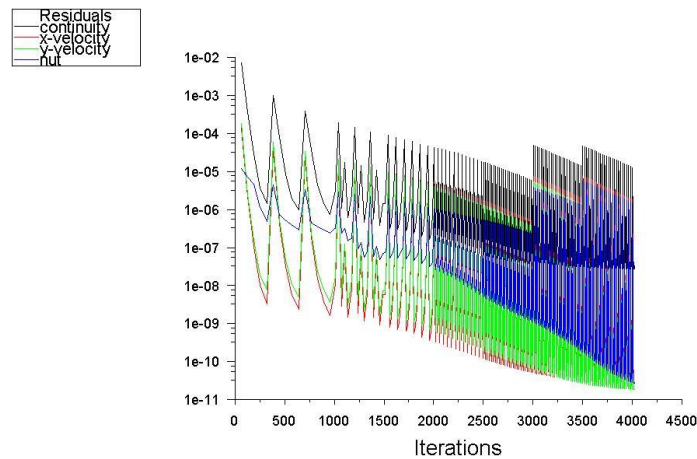


Figura 4. 8: Convergencia del residual de masa en el modelo transitorio a $\alpha_a=15^\circ$

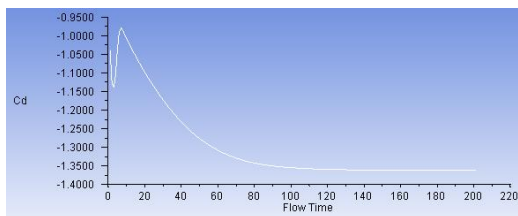


Figura 4. 9: Convergencia del coeficiente de arrastre en el modelo transitorio a $\alpha_a=15^\circ$

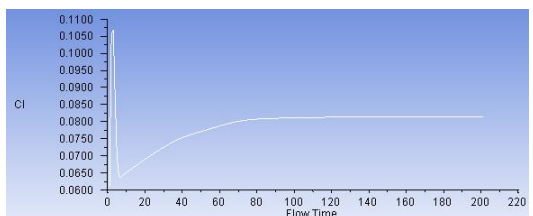


Figura 4. 10: Convergencia del coeficiente de sustentación en el modelo transitorio a $\alpha_a=15^\circ$

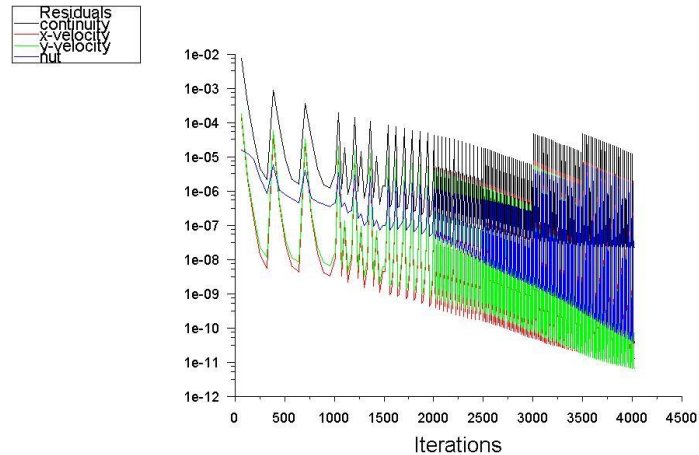


Figura 4. 11: Convergencia del residual de masa en el modelo transitorio a $\alpha_a=17,5^\circ$

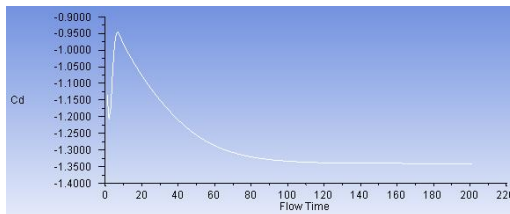


Figura 4. 12: Convergencia del coeficiente de arrastre en el modelo transitorio a $\alpha_a=17,5^\circ$

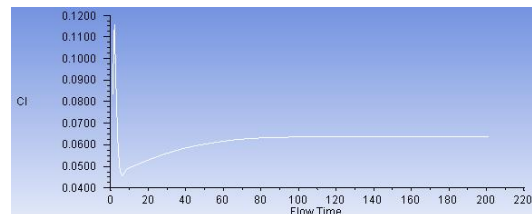


Figura 4. 13: Convergencia del coeficiente de sustentación en el modelo transitorio a $\alpha_a=17,5^\circ$

Como se puede apreciar, ahora los residuales son bajos y los coeficientes convergen. Tras observar que los resultados son óptimos, se decide usar modelos transitorios para estos ángulos.

También, se ha estudiado el tratamiento en la pared. Las gráficas y^+ a lo largo del perfil de la vela, para todos los ángulos de α_a , están mostradas en los anexos. Como se puede confirmar al mirarlas, el $y^+ < 5$ a lo largo del perfil en todas ellas. Debido a que la situación no ha variado, lo explicado en el apartado 3.5.6.1. sigue prevaleciendo.

A la vista de los valores obtenidos, se concluye que, todos los modelos usados para presentar los resultados tienen validez.

4.3. Presentación de resultados

En este apartado, se presentarán primero unas tablas de soluciones, en la que se indicarán los ángulos y las fuerzas, definidas en el apartado de planteamiento de las simulaciones. Más adelante, los gráficos asociados a la tabla, analizando los resultados debajo de cada uno.

Posteriormente, se presentarán y comentarán otros datos interesantes para completar. Se estudiarán sólo para algunos de los ángulos de α_a simulados.

Los datos están sacados a través del programa CFD-Post. Éstos, están formados por: contornos de velocidad, presión y vorticidad, líneas de corriente y gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela.

El resto de figuras, correspondientes a los demás ángulos α_a , se podrán consultar en el anexo si se desea.

4.3.1. Tablas de soluciones

Las tablas de soluciones son estas:

α_a (°)	Vx (nudos)	Vy (nudos)	Fx (N)	Fy (N)
90	10	0	-72,04	0,03
80	9,85	1,74	-71,73	0,58
67,5	9,24	3,83	-70,38	1,20
55	8,19	5,74	-67,80	1,71
45	7,07	7,07	-64,72	1,98
35	5,74	8,19	-60,85	2,11
22,5	3,83	9,24	-55,42	2,21
20	3,42	9,40	-54,69	2,32
17,5	3,01	9,54	-54,31	2,59
15	2,59	9,66	-55,17	3,30
12,5	2,16	9,76	-58,28	4,89
10	1,74	9,85	-61,05	5,54
7,5	1,31	9,91	-60,38	4,68
5	0,87	9,96	-56,34	3,07
2,5	0,44	9,99	-49,27	1,16
0	0	10	-39,18	-0,78
-2,5	-0,44	9,99	-23,99	-2,49
-5	-0,87	9,96	-0,09	-3,06

Tabla 4. 2: Velocidades y fuerzas respecto a los ejes "x" e "y".

α_a (°)	Dirección barco: α_b (°)				Dirección barco: α_b (°)			
	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)
90	90	-90	-72,04	0,03	70	-70	-67,69	24,67
80	80	-80	-70,54	13,03	60	-60	-61,83	36,37
67,5	67,5	-67,5	-64,56	28,04	47,5	-47,5	-51,08	48,43
55	55	-55	-54,55	40,28	35	-35	-37,49	56,51
45	45	-45	-44,36	47,16	25	-25	-25,56	59,49
35	35	-35	-33,17	51,06	15	-15	-13,71	59,32
22,5	22,5	-22,5	-19,17	52,05	2,5	-2,5	-0,21	55,46
20	20	-20	-16,52	52,18	0	0	2,32	54,69
17,5	17,5	-17,5	-13,86	52,57	-2,5	2,5	4,95	54,14
15	15	-15	-11,09	54,14	-5	5	8,10	54,67
12,5	12,5	-12,5	-7,84	57,96	-7,5	7,5	12,46	57,14
10	10	-10	-5,14	61,08	-10	10	16,06	59,16
7,5	7,5	-7,5	-3,24	60,47	-12,5	12,5	17,64	57,93
5	5	-5	-1,85	56,40	-15	15	17,55	53,63
2,5	2,5	-2,5	-0,99	49,27	-17,5	17,5	15,92	46,64
0	0	0	-0,78	39,18	-20	20	12,67	37,08
-2,5	-2,5	2,5	-1,44	24,08	-22,5	22,5	6,88	23,12
-5	-5	5	-3,04	0,36	-25	25	-2,73	1,37

Tabla 4. 3: Ángulos θ , α_v y fuerzas respecto a los ejes x' e y' para α_b igual a 0° y 20° .

α_a (°)	Dirección barco: α_b (°)				Dirección barco: α_b (°)			
	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)
90	50	-50	-55,17	46,33	30	-30	-35,99	62,40
80	40	-40	-45,66	55,32	20	-20	-23,99	67,60
67,5	27,5	-27,5	-31,43	62,98	7,5	-7,5	-8,00	69,93
55	15	-15	-15,90	65,93	-5	5	7,61	67,39
45	5	-5	-3,67	64,65	-15	15	18,66	62,00
35	-5	5	7,41	60,43	-25	25	27,63	54,26
22,5	-17,5	17,5	18,77	52,19	-37,5	37,5	35,49	42,62
20	-20	20	20,88	50,59	-40	40	36,93	40,40
17,5	-22,5	22,5	23,17	49,18	-42,5	42,5	38,60	38,29
15	-25	25	26,31	48,60	-45	45	41,34	36,68
12,5	-27,5	27,5	31,25	49,43	-47,5	47,5	46,27	35,76
10	-30	30	35,32	50,10	-50	50	50,33	35,00
7,5	-32,5	32,5	36,39	48,41	-52,5	52,5	50,75	33,04
5	-35	35	34,83	44,39	-55	55	47,92	29,80
2,5	-37,5	37,5	30,91	38,38	-57,5	57,5	42,17	25,50
0	-40	40	24,59	30,51	-60	60	33,54	20,27
-2,5	-42,5	42,5	14,37	19,37	-62,5	62,5	20,13	13,29
-5	-45	45	-2,10	2,23	-65	65	-1,21	2,81

Tabla 4. 4: Ángulos θ , α_v y fuerzas respecto a los ejes x' e y' para α_b igual a 40° y 60°.

α_a (°)	Dirección barco: α_b (°)				Dirección barco: α_b (°)			
	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)
90	10	-10	-12,48	70,95	-10	10	12,54	70,94
80	0	0	0,58	71,73	-20	20	25,08	67,21
67,5	-12,5	12,5	16,40	68,45	-32,5	32,5	38,83	58,71
55	-25	25	30,20	60,72	-45	45	49,15	46,73
45	-35	35	38,74	51,88	-55	55	54,15	35,50
35	-45	45	44,52	41,53	-65	65	56,04	23,80
22,5	-57,5	57,5	47,93	27,91	-77,5	77,5	54,58	9,84
20	-60	60	48,52	25,33	-80	80	54,26	7,21
17,5	-62,5	62,5	49,36	22,78	-82,5	82,5	54,18	4,52
15	-65	65	51,39	20,32	-85	85	55,25	1,52
12,5	-67,5	67,5	55,72	17,78	-87,5	87,5	58,44	-2,35
10	-70	70	59,26	15,67	-90	90	61,05	-5,54
7,5	-72,5	72,5	58,99	13,69	-92,5	92,5	60,12	-7,31
5	-75	75	55,22	11,62	-95	95	55,86	-7,97
2,5	-77,5	77,5	48,35	9,53	-97,5	97,5	48,70	-7,58
0	-80	80	38,45	7,57	-100	100	38,72	-6,04
-2,5	-82,5	82,5	23,46	5,60	-102,5	102,5	23,96	-2,76
-5	-85	85	-0,18	3,05	-105	105	0,88	2,93

Tabla 4. 5: Ángulos θ , α_v y fuerzas respecto a los ejes x' e y' para α_b igual a 80° y 100°.

α_a (°)	Dirección barco: α_b (°)				Dirección barco: α_b (°)			
	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)
90	-30	30	36,05	62,37	-50	50	55,21	46,28
80	-40	40	46,55	54,58	-60	60	62,41	35,36
67,5	-52,5	52,5	56,57	41,89	-72,5	72,5	67,48	20,02
55	-65	65	62,17	27,10	-85	85	67,69	4,21
45	-75	75	63,03	14,84	-95	95	64,30	-7,61
35	-85	85	60,80	3,20	-105	105	58,23	-17,79
22,5	-97,5	97,5	54,66	-9,42	-117,5	117,5	48,14	-27,55
20	-100	100	53,45	-11,78	-120	120	46,20	-29,35
17,5	-102,5	102,5	52,46	-14,28	-122,5	122,5	44,41	-31,36
15	-105	105	52,43	-17,47	-125	125	43,30	-34,35
12,5	-107,5	107,5	54,11	-22,19	-127,5	127,5	43,26	-39,36
10	-110	110	55,47	-26,09	-130	130	43,20	-43,49
7,5	-112,5	112,5	53,99	-27,43	-132,5	132,5	41,35	-44,25
5	-115	115	49,77	-26,60	-135	135	37,67	-42,01
2,5	-117,5	117,5	43,17	-23,78	-137,5	137,5	32,43	-37,11
0	-120	120	34,32	-18,91	-140	140	25,78	-29,51
-2,5	-122,5	122,5	21,57	-10,79	-142,5	142,5	16,58	-17,52
-5	-125	125	1,83	2,45	-145	145	2,56	1,68

Tabla 4. 6: Ángulos θ , α_v y fuerzas respecto a los ejes x' e y' para α_b igual a 120° y 140° .

α_a (°)	Dirección barco: α_b (°)				Dirección barco: α_b (°)			
	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)	θ (°)	α_v (°)	Fy' avance (N)	Fx' deriva (N)
90	-70	70	67,71	24,61	-90	90	72,04	-0,03
80	-80	80	70,74	11,89	-100	100	70,54	-13,03
67,5	-92,5	92,5	70,26	-4,27	-112,5	112,5	64,56	-28,04
55	-105	105	65,04	-19,20	-125	125	54,55	-40,28
45	-115	115	57,82	-29,15	-135	135	44,36	-47,16
35	-125	125	48,63	-36,63	-145	145	33,17	-51,06
22,5	-137,5	137,5	35,81	-42,35	-157,5	157,5	19,17	-52,05
20	-140	140	33,37	-43,38	-160	160	16,52	-52,18
17,5	-142,5	142,5	31,01	-44,66	-162,5	162,5	13,86	-52,57
15	-145	145	28,94	-47,08	-165	165	11,09	-54,14
12,5	-147,5	147,5	27,18	-51,78	-167,5	167,5	7,84	-57,96
10	-150	150	25,73	-55,64	-170	170	5,14	-61,08
7,5	-152,5	152,5	23,72	-55,72	-172,5	172,5	3,24	-60,47
5	-155	155	21,03	-52,36	-175	175	1,85	-56,40
2,5	-157,5	157,5	17,79	-45,96	-177,5	177,5	0,99	-49,27
0	-160	160	14,13	-36,55	-180	180	0,78	-39,18
-2,5	-162,5	162,5	9,59	-22,13	-182,5	182,5	1,44	-24,08
-5	-165	165	2,98	0,71	-185	185	3,04	-0,36

Tabla 4. 7: Ángulos θ , α_v y fuerzas respecto a los ejes x' e y' para α_b igual a 160° y 180° .

En la tabla 4. 2, se puede observar por componentes “x” e “y”, respecto a los distintos ángulos de entrada de aire, las velocidades y fuerzas generadas en el perfil de la vela.

Las fuerzas “x” e “y” son datos extraídos directamente de Fluent. Las velocidades de la tabla se han obtenido aplicando la siguiente fórmula:

$$V_x = V_a \cdot \sin\left(\frac{\alpha_a \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right) \quad (4. 7)$$

$$V_y = V_a \cdot \cos\left(\frac{\alpha_a \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right) \quad (4. 8)$$

Donde:

- V_x : velocidad del aire en dirección del eje “x” positivo.
- V_y : velocidad del aire en dirección del eje “y” positivo.
- V_a : módulo de la velocidad del aire. Es constante e igual a diez nudos.

Añadir que, como se puede apreciar en la tabla, la mayor fuerza generada es claramente en dirección “x” negativa, minorándose ésta según el ángulo del aire decrece.

En las tablas que van desde la 4.3 hasta la 4.7, se perciben los datos, nuevamente, respecto a los distintos ángulos de entrada de aire. Los datos, corresponden a: ángulos de cambio de coordenadas (θ), ángulos de vela (α_v), fuerzas de avance (F_y) y fuerzas de deriva (F_x). Los datos se muestran cada veinte grados de variación del ángulo del barco (α_b).

Los valores de F_x , F_y , θ y α_v , se calculan siguiendo las ecuaciones 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 respectivamente.

Los puntos más interesantes de la tabla son aquellos donde se maximiza la fuerza de avance y se minimiza la fuerza de deriva. Los gráficos mostrados en las figuras 4.14, 4.15 y 4.21 ayudarán a visualizarlo mejor.

4.3.2. Gráficos de las tablas de soluciones

En este apartado se mostrarán y analizarán, por subapartados, tres gráficos obtenidos a partir de los datos de las tablas de soluciones.

4.3.2.1. Gráfico de fuerzas de avance y deriva con todos los ángulos de α_b :

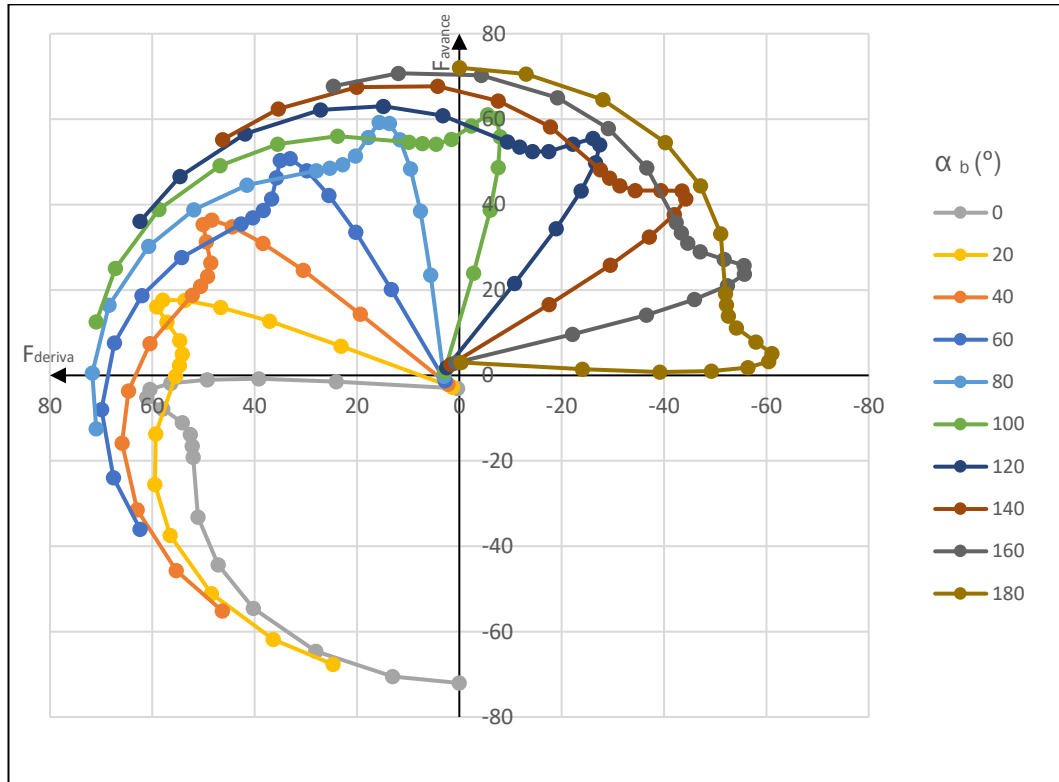


Figura 4. 14: Gráfico de fuerzas de avance y deriva según α_a para α_b de 0 a 180 grados.

En este primer gráfico, se observa, a través de comparar entre los distintos ángulos del barco (α_b) respecto del ángulo del aire (α_a) entrante, las fuerzas de avance y deriva que pueden desarrollarse. Dichas fuerzas van variando para las diversas posiciones de la vela. Las posiciones óptimas de la vela ya se discutirán en los gráficos de las figuras 4.15 y 4.21.

Los puntos se han obtenido a través de una simulación, en dos dimensiones, del perfil de la vela. En la simulación, no se tiene en cuenta otros efectos aerodinámicos del barco que influirían en su posición relativa, cómo puede ser su casco. Esto produce que la gráfica, entre series, sea axilsimétrica respecto al eje "z". Por tanto, se podrían completar fácilmente el resto de posiciones de α_b .

Además de lo anterior, como el perfil de la vela es simétrico (debido a la simetría del perfil de presiones), cada serie dibujada en el gráfico sería simétrica si se prolongara. La simetría se produciría, para cada serie, respecto al eje que une el punto de origen de coordenadas y el punto final de la serie. A

cero y ciento ochenta grados coincidiría con el eje “y” del gráfico. Por lo que, una vez más, sería fácil completarlo si se desea. Esto no se ha hecho para evitar estudiar resultados repetidos.

Observando la figura, se distingue como los puntos de las curvas siguen una distribución parabólica, cercana a la de una circunferencia, hasta llegar a un cierto valor. En ese punto, tras una perturbación en forma de pico, decaen rápidamente hacia el origen de coordenadas.

Como se dijo anteriormente, las posiciones óptimas son las de máxima fuerza de avance y mínima fuerza de deriva. Si se mira el gráfico es apreciado como las fuerzas de avance llegan a alcanzar valores mayores según aumenta α_b . Pensándolo, es totalmente lógico, ya que, se estudian las posiciones del barco desde que α_b vale cero grados, es decir, cuando el barco va totalmente en contra del viento, hasta que, α_b es igual a ciento ochenta grados, es decir, cuando el barco va totalmente a favor del viento.

Contemplando la serie de α_b igual a cero grados, queda constatado que, si el barco va totalmente en contra del viento, da igual la posición de la vela adoptada, puesto que no se conseguirá ningún avance positivo.

Por el contrario, si el barco navega totalmente a favor del viento la situación es la contraria, pudiendo encontrar una posición óptima donde se maximiza la fuerza de avance y se anula la de deriva.

Para posiciones intermedias, se advierte que no es posible encontrar una solución en la cual se maximice el avance y se minimiza la deriva. Por esta razón, tocará adoptar soluciones de compromiso en muchas ocasiones.

En principio, el criterio que se adoptará, si es posible, será el de maximizar la fuerza de avance. Esto será así mientras la fuerza de deriva sea soportable. Entendiéndose como soportable cuando se evite volcar, en contextos de competición, o cuando la navegación no se vuelva demasiado incómoda o complicada, en situaciones alejadas de la competición.

No llegar a esa situación, provocada por la fuerza de deriva, dependerá principalmente de varios factores, como son:

- El ángulo del barco respecto del aire: hay posiciones donde es requerida más o menos deriva para maximizar el avance. En general, como se puede ver en el gráfico, para vientos más favorables serán necesarias menores fuerzas de deriva para maximizar el avance. Por tanto, será menos complicado maximizar el avance en vientos favorables que en desfavorables.
- La velocidad del aire: a mayor velocidad se genera más fuerza, siguiendo una relación cuadrática, como se puede ver en la fórmula 3.26. Entonces, con vientos fuertes, aunque obviamente será posible alcanzar una mayor velocidad en el velero, la fuerza de deriva, asociada a dicha velocidad, será bastante mayor. Esta situación, hace que sea más difícil llegar a la posición con máxima fuerza de avance.

Sumado a esos factores, hay que tener en cuenta siempre a dónde nos queramos dirigir. Queriendo ir en dirección opuesta al aire, por rapidez o comodidad es más eficiente navegar en ceñida, por ejemplo, a cuarenta grados en contra del aire que, a veinte, ya que así, se puede recorrer esos metros (aun siendo más), más veloz y placenteramente.

4.3.2.2. Gráfico de fuerzas de avance y deriva con α_b menor a 90°

El barco está orientado de tal forma que el aire viene por la proa. Son los llamados vientos de proa:

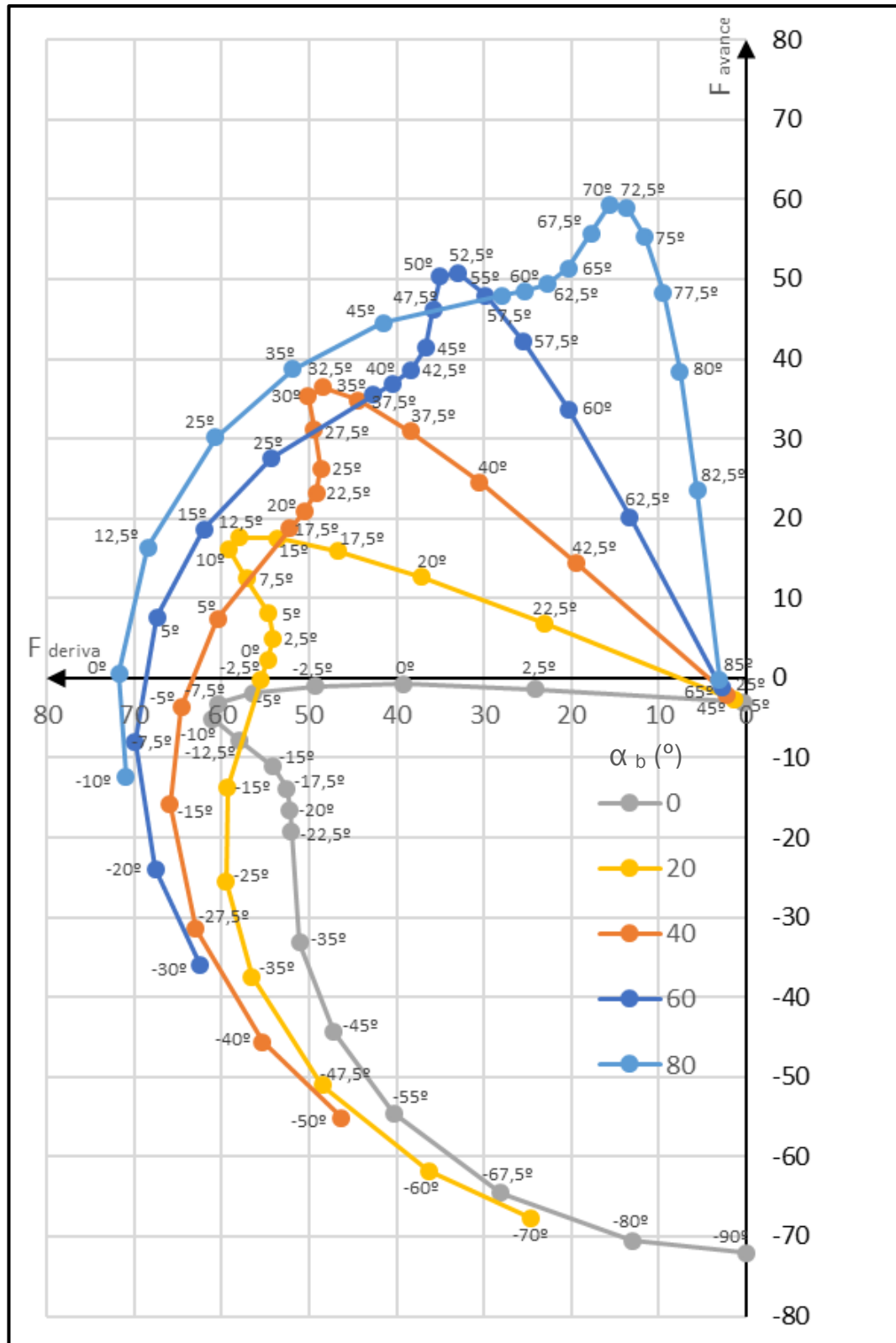


Figura 4. 15: Gráfico de fuerzas de avance y deriva según α_a para α_b de 0 a 90 grados.

Lo primero que destaca al observar este gráfico, es que, exceptuando para ángulos del barco (α_b) igual a cero grados (este ángulo tiene poca importancia), los valores de fuerza de avance tienden a maximizarse en la zona del resalte.

Si se habla de los ángulos de vela (α_v) correspondientes a la fuerza de máximo avance, se ve que están, en general, en torno a un valor de α_v respecto de α_b , de unos siete y medio o diez grados por debajo. Esto es lo mismo que decir, si aplicamos la fórmula 4.6, que el ángulo del aire (α_a) es igual a siete y medio o diez grados. Concretando, para $\alpha_b = 80^\circ$ sería: $\alpha_v = 70^\circ$ y $\alpha_a = 10^\circ$; para $\alpha_b = 60^\circ$ sería: $\alpha_v = 52,5^\circ$ y $\alpha_a = 7,5^\circ$; para $\alpha_b = 40^\circ$, un $\alpha_v = 32,5^\circ$ y un $\alpha_a = 7,5^\circ$; y por último, en $\alpha_b = 20^\circ$ correspondería: $\alpha_v = 12,5^\circ$ y $\alpha_a = 7,5^\circ$. En el caso de $\alpha_b = 0^\circ$, la fuerza de avance máxima no estaría en la cresta y se hablaría de $\alpha_v = 0^\circ$, por tanto, $\alpha_a = 0^\circ$.

Para explicar más detalladamente que significa esto, se han dibujado, a continuación, las posiciones anteriores óptimas en α_b igual a ochenta, sesenta, cuarenta y veinte grados:

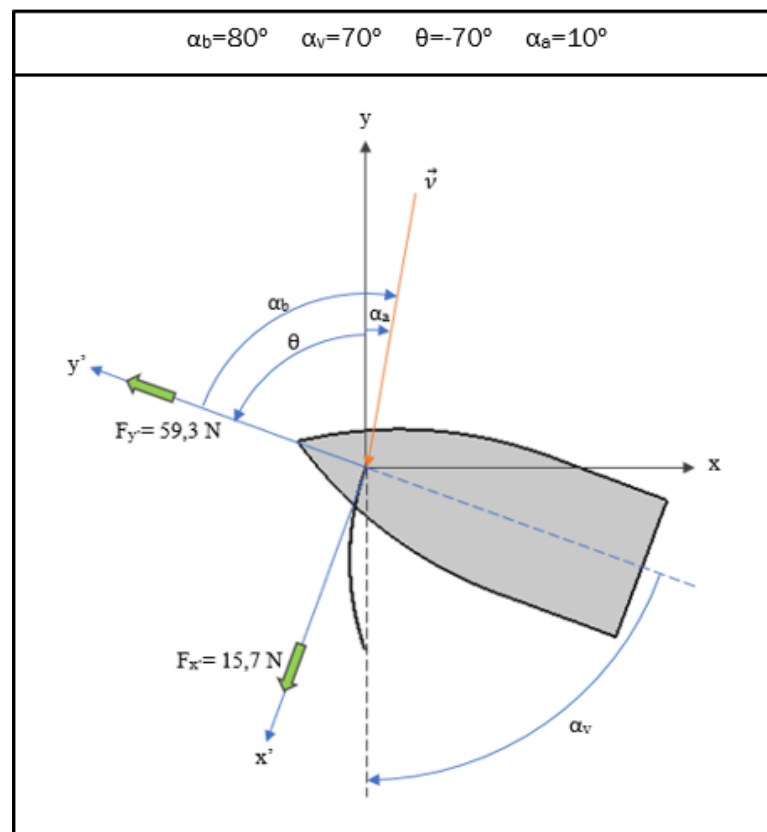


Figura 4. 16: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=80^\circ$.

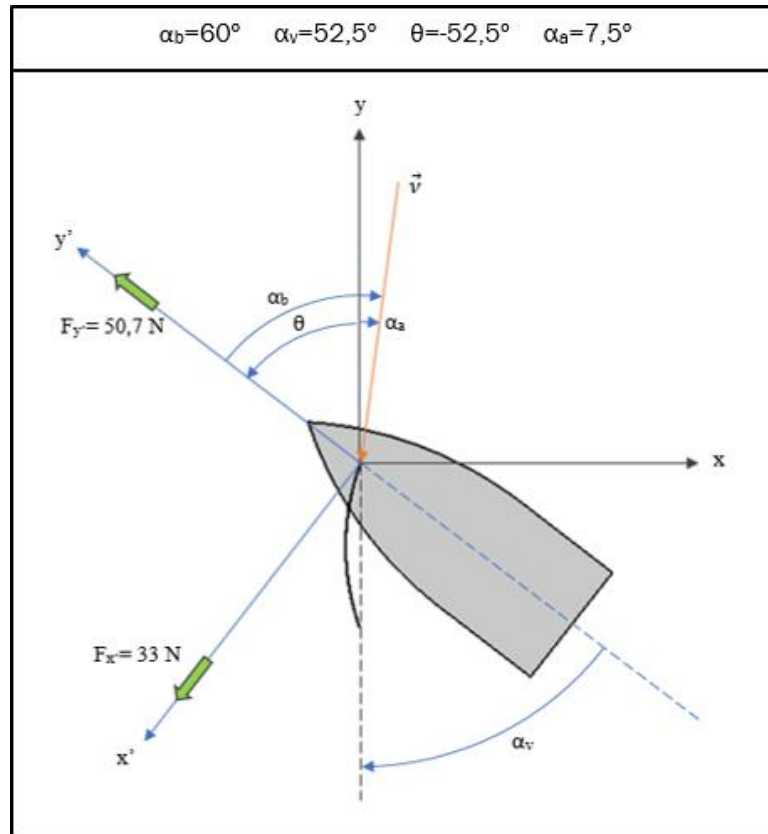


Figura 4. 17: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=60^\circ$.

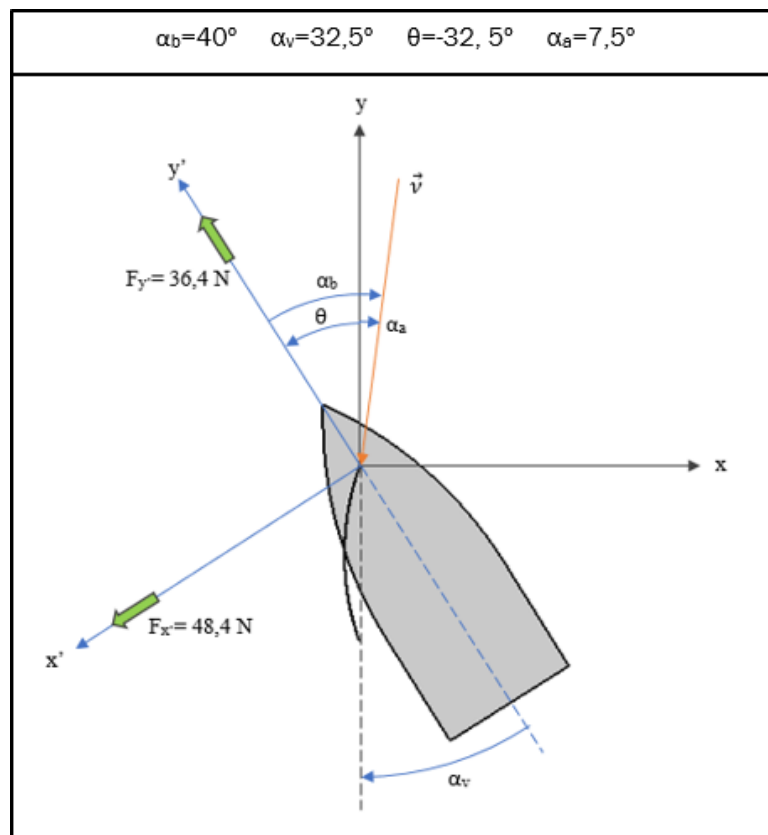


Figura 4. 18: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=40^\circ$.

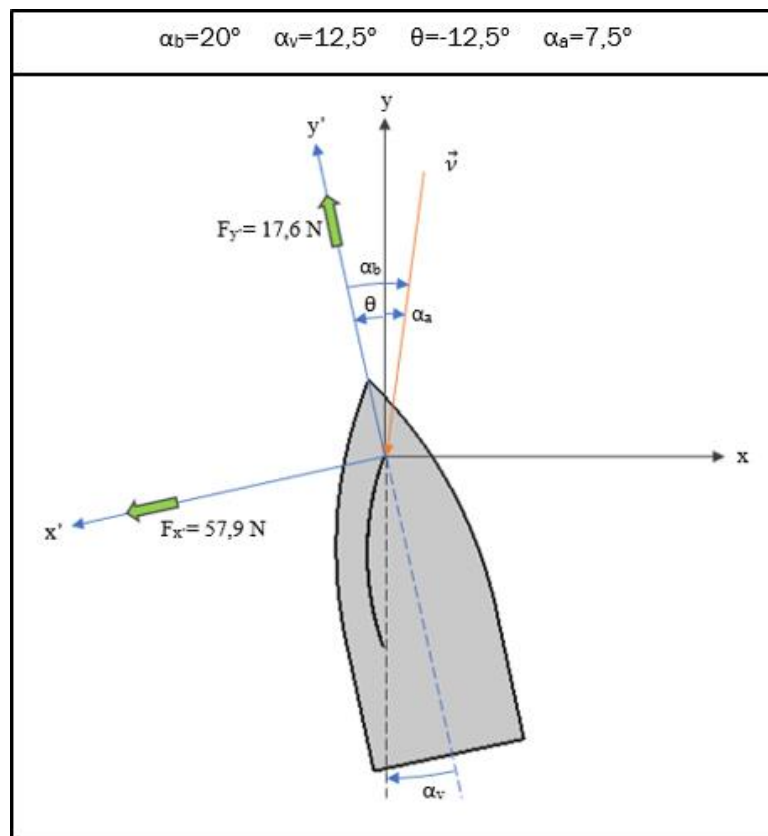


Figura 4. 19: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=20^\circ$.

Viendo las figuras, en las cuales se maximiza el avance, se puede observar como el perfil de la vela mantiene el mismo funcionamiento, ya que el ángulo óptimo de la vela respecto del aire (α_a) se mantiene aproximadamente constante en todas las condiciones, aunque la dirección del barco respecto del aire (α_b) varíe. La situación se parece a la de funcionamiento en un perfil aerodinámico, como un álabe. En dichos escenarios, las posiciones óptimas se encuentran minimizando los desprendimientos de flujo, cuando el aire tiene un ángulo de entrada similar al de entrada al perfil.

Esta configuración corresponde al funcionamiento de la vela en situaciones donde la fuerza de sustentación tiene más peso que la fuerza de resistencia. Es el primer modo de funcionamiento de la vela que se describió en el apartado perteneciente a los fundamentos teóricos.

Pero no hay que olvidar que no siempre interesa, o se puede, maximizar el avance. Muchas veces, lo que importa es alcanzar un compromiso entre deriva y avance. Seguramente, por ejemplo, para $\alpha_b = 20^\circ$ sea mejor posición $\alpha_v = 17,5^\circ$, es decir, un $\alpha_a = 2,5^\circ$, ya que tiene mucha menos deriva y no aumenta el avance demasiado a partir de $\alpha_v = 17,5^\circ$, pero eso dependerá de cada situación específica.

Conviene destacar que los resultados obtenidos están basados en un perfil de vela rígido. Esto permite la existencia de presiones mayores en el extradós que en el intradós sin que la vela cambie la forma de su perfil. En una

situación real, la vela se deformaría a fin de mantener el equilibrio fuerzas, entre las presiones y las tensiones, que se planteó en el modelo explicado en el apartado 3.1., denominado “Fundamentación teórica”, y fue resuelto, más tarde, en la hoja Excel.

Para las posiciones que aquí se presentan como óptimas, el perfil de la vela tendría una forma como la que se muestra en la figura:

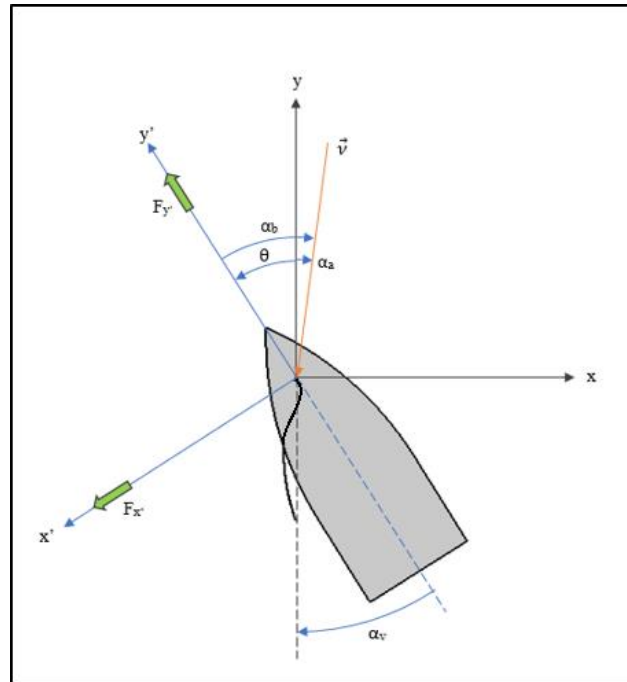


Figura 4. 20: Vela deformada

Queda así patente la necesidad de realizar un proceso iterativo, consistente en obtener los perfiles de presión en ambas caras de la vela y utilizarlos como entrada al modelo de cálculo del perfil de la vela.

En cualquier caso, los resultados de la posición óptima de la vela son próximos a los que se utilizan en la realidad. Pero en una situación de navegación real, la vela suele estar más cazada, es decir, tiene un ángulo de vela (α_v) menor.

4.3.2.3. Gráfico de fuerzas de avance y deriva con α_b mayor a 90°

El barco está orientado de tal forma que el aire viene por la popa. Son los llamados vientos de popa:

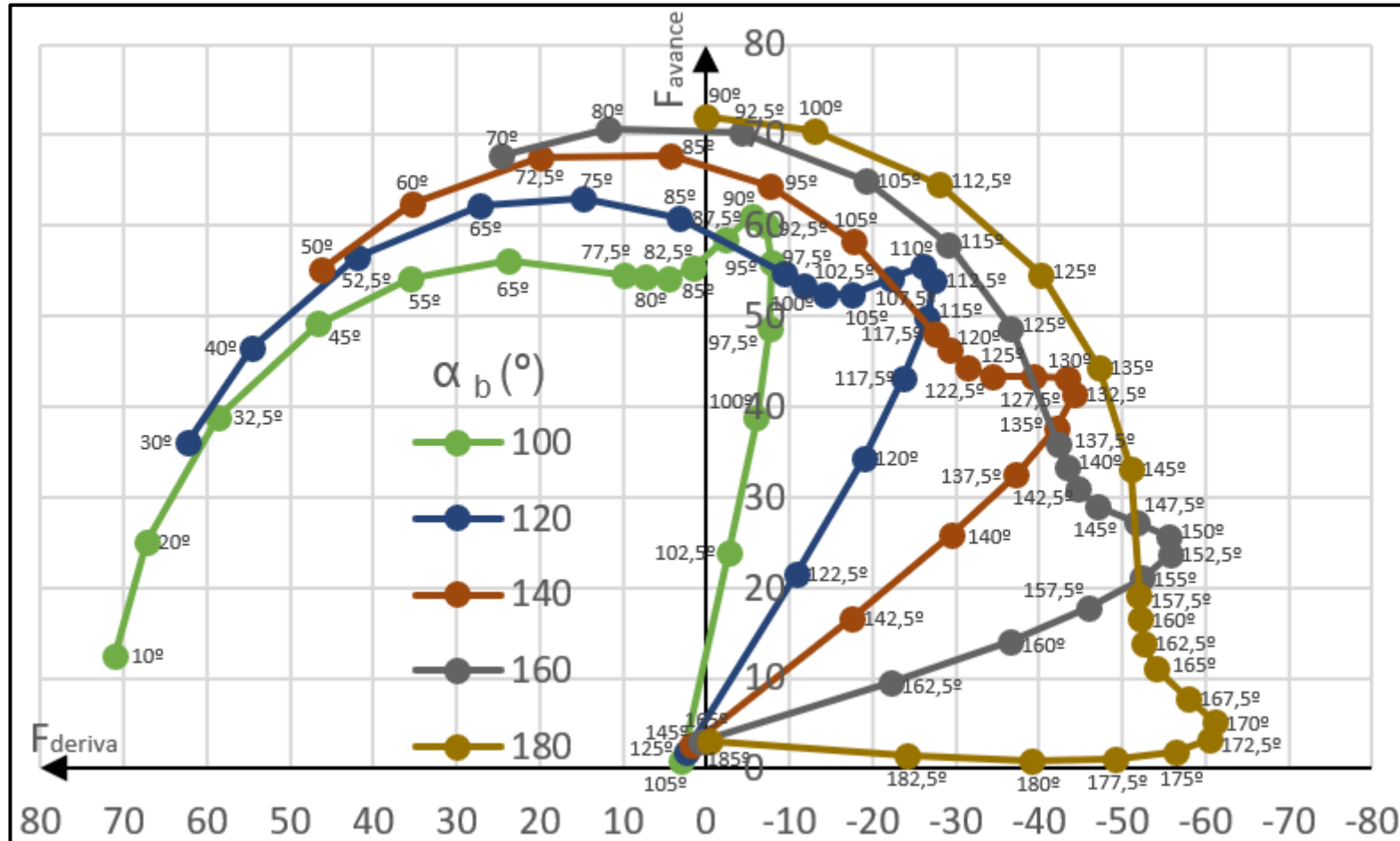


Figura 4. 21: Gráfico de fuerzas de avance y deriva según α_a para α_b de 90 a 180 grados.

En esta ocasión, llama la atención al mirar el gráfico, que a partir de un ángulo de barco (α_b) igual a ciento veinte grados, los valores máximos de fuerza de avance no se dan en la zona del resalte.

En α_b igual a cien grados aún se maximiza el avance en el saliente. Esta serie funciona igual que las del gráfico anterior, teniendo con avance máximo un valor de α_a de diez grados. Entonces, por consiguiente, quedarían un α_b igual a cien grados y un α_v igual a noventa.

Si se analiza ahora en el resto de las series los ángulos de vela con máxima fuerza, el α_a no se mantiene constante entre las curvas. Sí se aprecia, que la diferencia entre α_b y α_v , es decir α_a , va aumentando para cada serie. En estos puntos, se tienen: para $\alpha_b = 120^\circ$, un $\alpha_v = 75^\circ$ y un $\alpha_a = 45^\circ$; para $\alpha_b = 140^\circ$, un $\alpha_v = 85^\circ$ y un $\alpha_a = 55^\circ$; para $\alpha_b = 160^\circ$, un $\alpha_v = 80^\circ$ y un $\alpha_a = 80^\circ$; y por último en $\alpha_b = 180^\circ$, un $\alpha_v = 90^\circ$ y un $\alpha_a = 90^\circ$.

De nuevo, se han dibujado las posiciones con mayores fuerzas de avance para comprenderlo mejor:

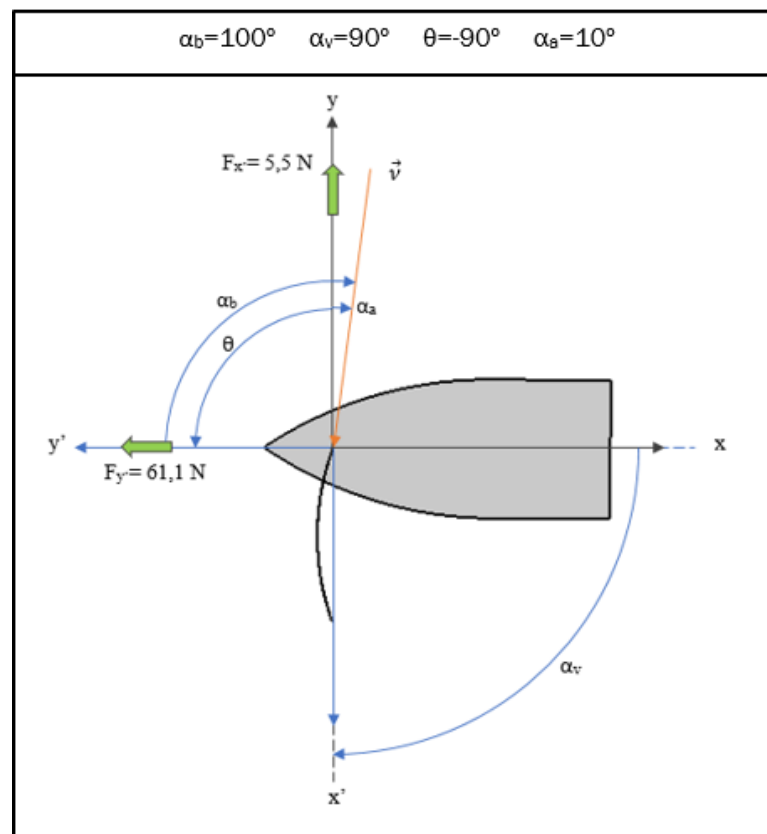


Figura 4. 22: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b = 80^\circ$.

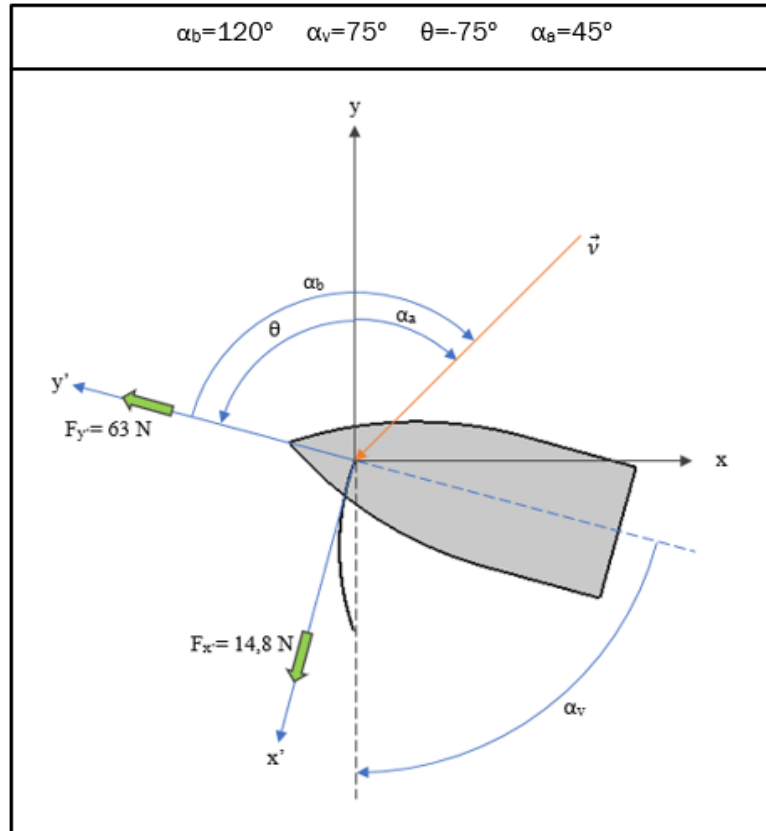


Figura 4. 23: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=120^\circ$.

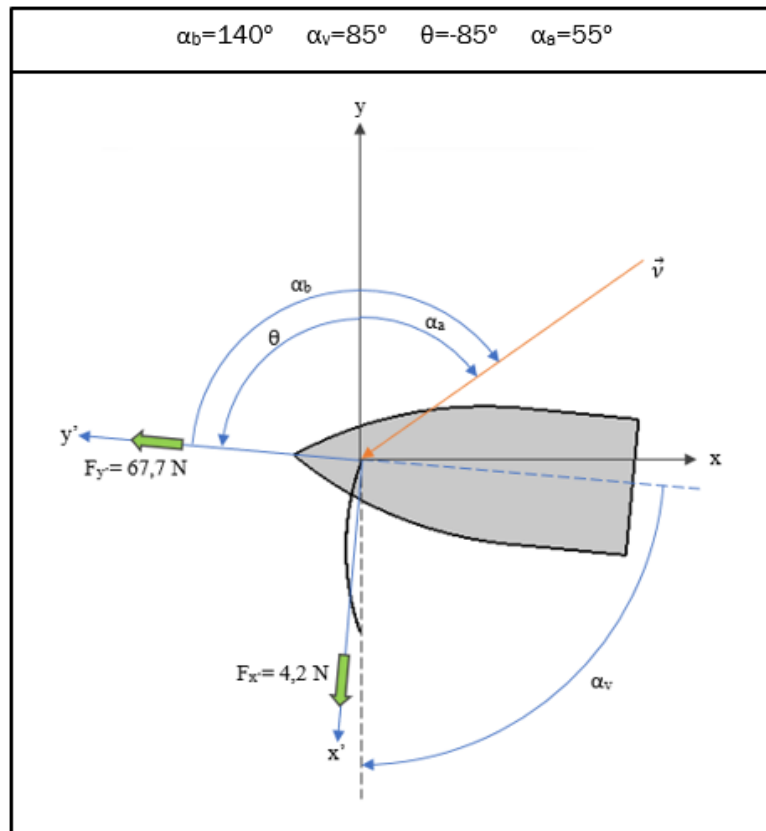


Figura 4. 24: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=140^\circ$.

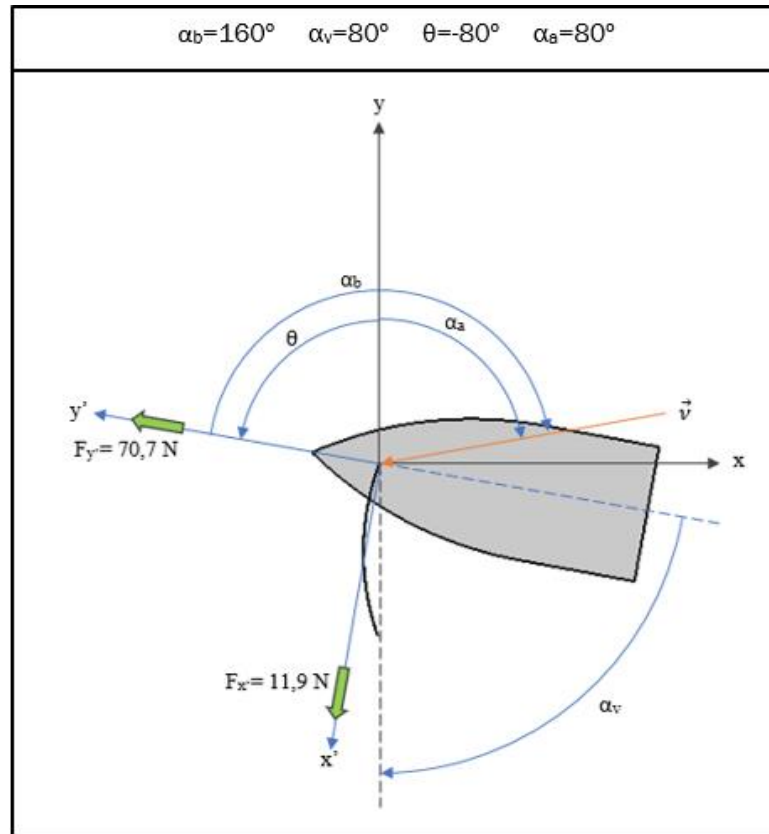


Figura 4. 25: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=160^\circ$.

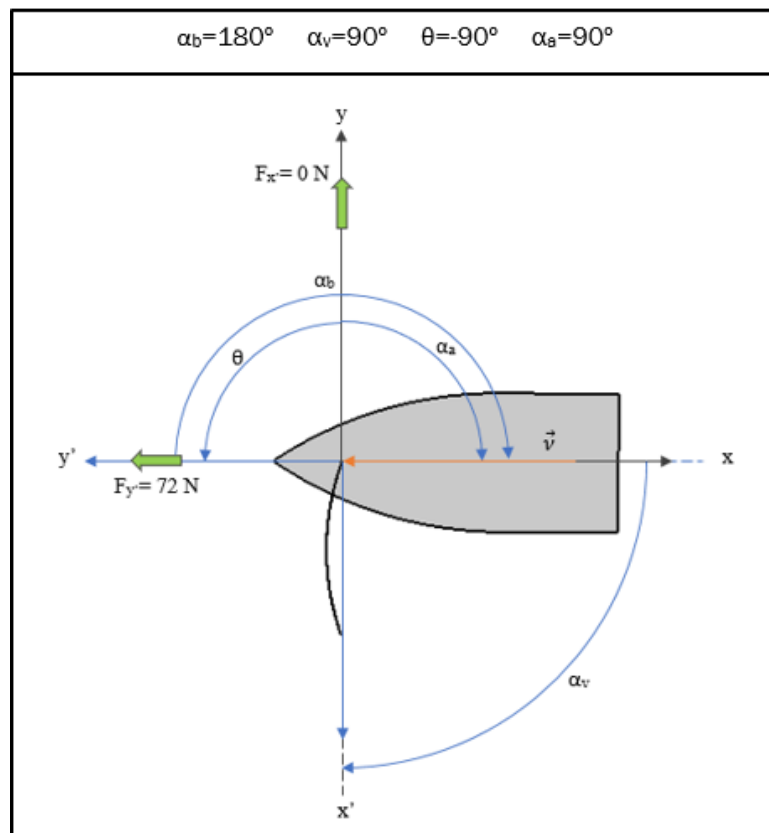


Figura 4. 26: Ángulos del barco de máxima fuerza de avance con $\alpha_b=180^\circ$.

En este caso, se ve como en las posiciones con máximas fuerzas de avance, las óptimas, el perfil de la vela pasa progresivamente de trabajar de una forma aerodinámica (hasta un valor de α_b comprendido entre los cien y ciento veinte grados), a otra en la cual el aire choca con la vela de forma frontal para impulsar el barco. Esta última configuración se desarrolla en su plenitud cuando el barco va totalmente a favor del viento, teniendo en posiciones intermedias una distribución híbrida, que es la que permite maximizar el avance.

Aquí, es apreciado como el funcionamiento de la vela pasa desde la situación donde la fuerza de sustentación es protagonista, hasta otra en la cual la fuerza de resistencia tiene todo el peso, pasando por escenarios intermedios. Esto coincide otra vez con lo descrito en el apartado de fundamentos teóricos.

4.3.3. Contornos de velocidad

Contornos de velocidad para varios ángulos de α_a :

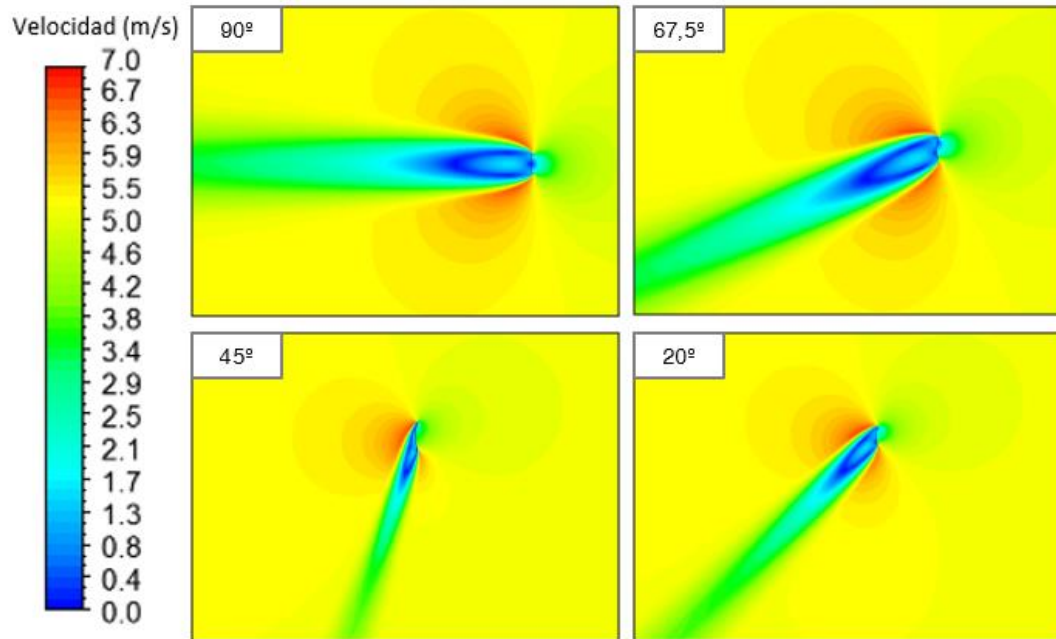


Figura 4. 27: Contornos de velocidad cerca del perfil de la vela 1.

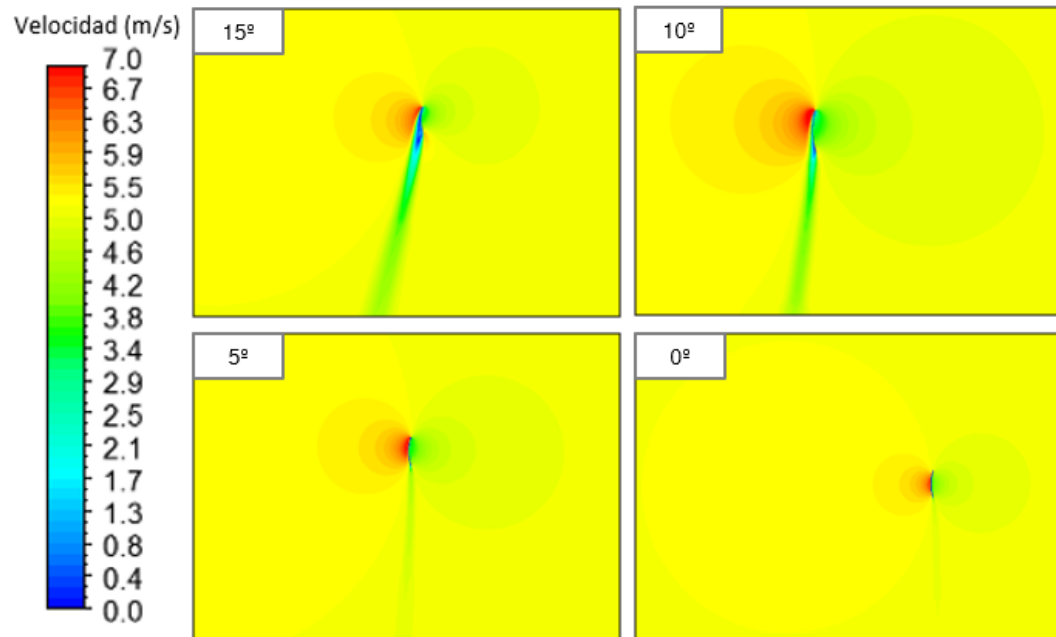


Figura 4. 28: Contornos de velocidad cerca del perfil de la vela 2.

En todos los contornos de velocidad, se ha elegido un rango común para la escala de valores. Esto se hace con el fin de compararlas mejor. Algunos de ellos están contenidos en un rango algo menor y otros se van fuera de rango en zonas muy concretas. Los valores fuera de rango quedan representadas con el color límite de escala, superior o inferior, según el caso. Todo lo

anterior será válido para el resto de contornos representados y líneas de corriente.

En los contornos de velocidad se van fuera de rango los ángulos pequeños no nulos, concretamente en quince, diez y cinco grados. Dicha situación acontece solamente en el área contigua al extradós del perfil de la vela, en su zona superior, llegando hasta una velocidad de ocho metros y medio por segundo.

Lo primero a destacar si se analizan los contornos, es que, cuando el flujo de aire incidente se acerca más a la perpendicularidad en el perfil de la vela, la distorsión de la velocidad aumenta.

La velocidad de aire es menor a la que posee a su entrada al modelo en las zonas, cercanas al perfil de la vela, situadas a su derecha, y es inferior aún, dentro de las situadas a su izquierda, en las que quedan a sotavento del perfil.

Por el contrario, la velocidad aumenta en todas las áreas cercanas al extradós del perfil situadas a su izquierda, exceptuando las que están a sotavento de la vela. El incremento de la velocidad, producido por la disminución de presión, es influenciado debido a que en esas zonas las partículas tienen que sortear diversos elementos, éste es, entre otros, la curvatura en la vela. El otro elemento que salvar son los torbellinos generados cerca del perfil, como se verá al estudiar las líneas de corriente.

La apreciación de la influencia de la curvatura de la vela, en el aumento de la velocidad, se puede ver muy bien para cero grados. En dicho contorno, ya que casi no existen zonas a resguardo del aire (el aire llega paralelo al perfil), la velocidad es menor en todas las zonas cercanas a la cara interna del perfil colocadas a su derecha y mayor en todas las de su izquierda.

4.3.4. Contornos de presión

Contornos de presión manométrica en distintos ángulos de α_a :

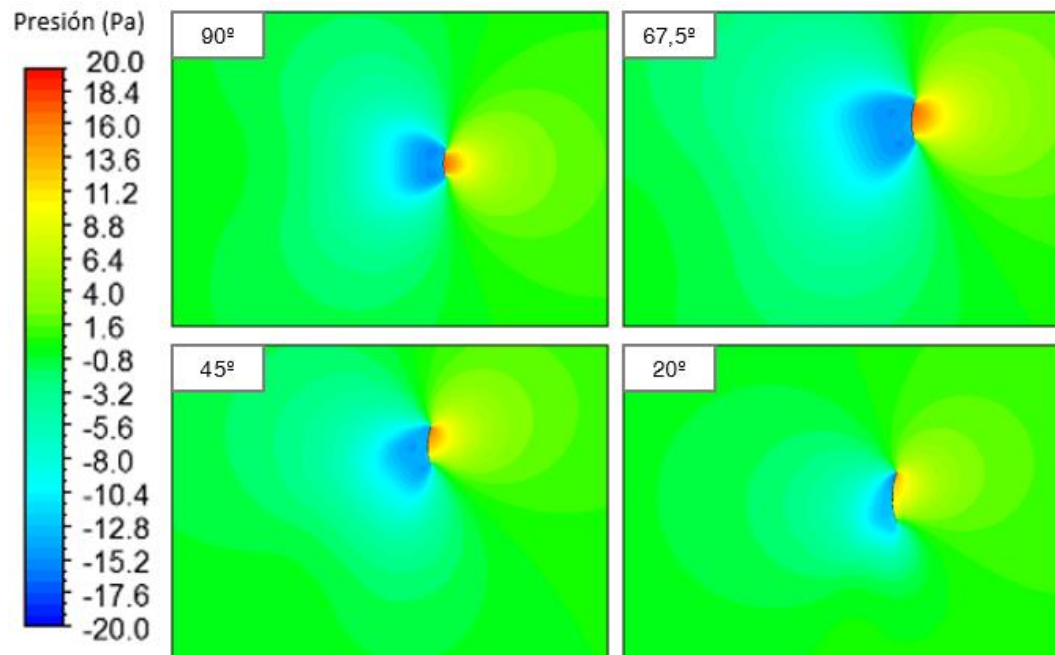


Figura 4. 29: Contornos de presión cerca del perfil de la vela 1.

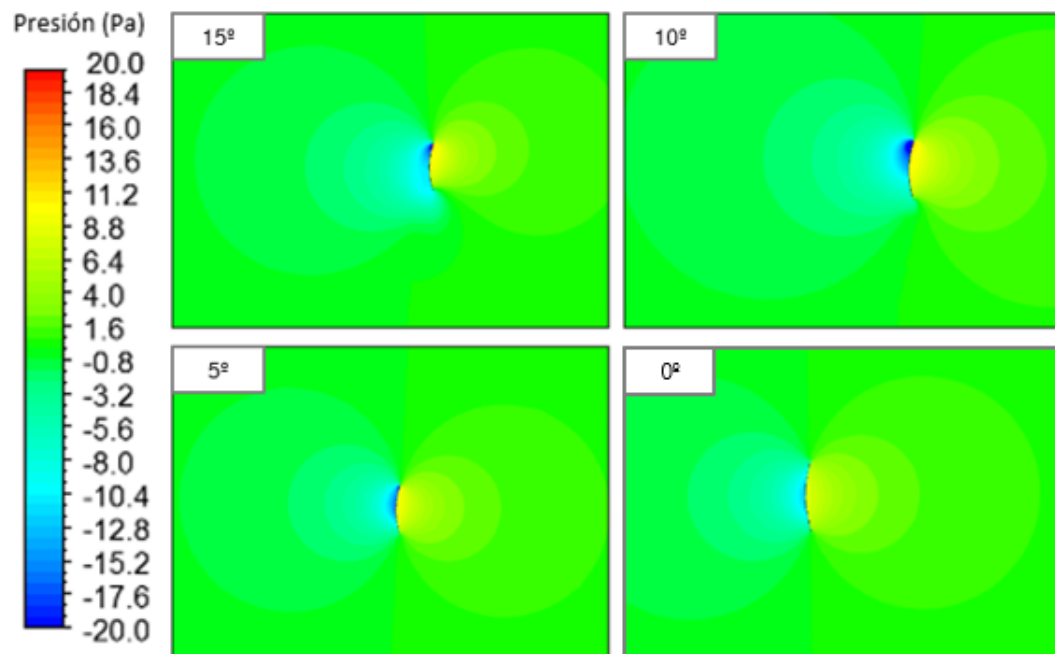


Figura 4. 30: Contornos de presión cerca del perfil de la vela 2

Existe una minoría de contornos de presión que tienen valores fuera de escala. Sucede en la mismas figuras y localización de los contornos de velocidad, teniendo valores de hasta menos sesenta pascales.

De todas formas, para el caso de la presión, se podrá ver mejor la zona del perfil de la vela sometida a presiones fuera de rango (y a las demás), en los gráficos del perfil de la vela mostrados más adelante.

El hecho de que coincidan las zonas de velocidad fuera de rango con la de presiones es algo esperado, ya que, en las zonas donde la presión disminuye, la velocidad crece, como ya se ha justificado anteriormente en el apartado 2.2 del trabajo.

Mirando los contornos se ve que, en todos ellos, en las zonas cercanas al perfil emplazadas a su derecha la presión es más alta que en las de su izquierda.

Debido a que la vela tiene la función de crear una diferencia de presiones para, a partir de ella, generar la fuerza necesaria para impulsar el barco, el barco se moverá, según lo explicado en el apartado dos, hacia la izquierda de las figuras. Se puede consultar como en la tabla 4.2 la fuerza “x” es negativa, es decir, hacia la izquierda.

Otra cosa apreciada es que la mayor diferencia de presiones es para los ángulos de α_a más elevados, por lo que la fuerza generada será mayor en esas posiciones. Esto es posible observarlo, nuevamente, en la tabla 4.2.

4.3.5. Contornos de vorticidad

Contornos de vorticidad en algunos ángulos de α_a :

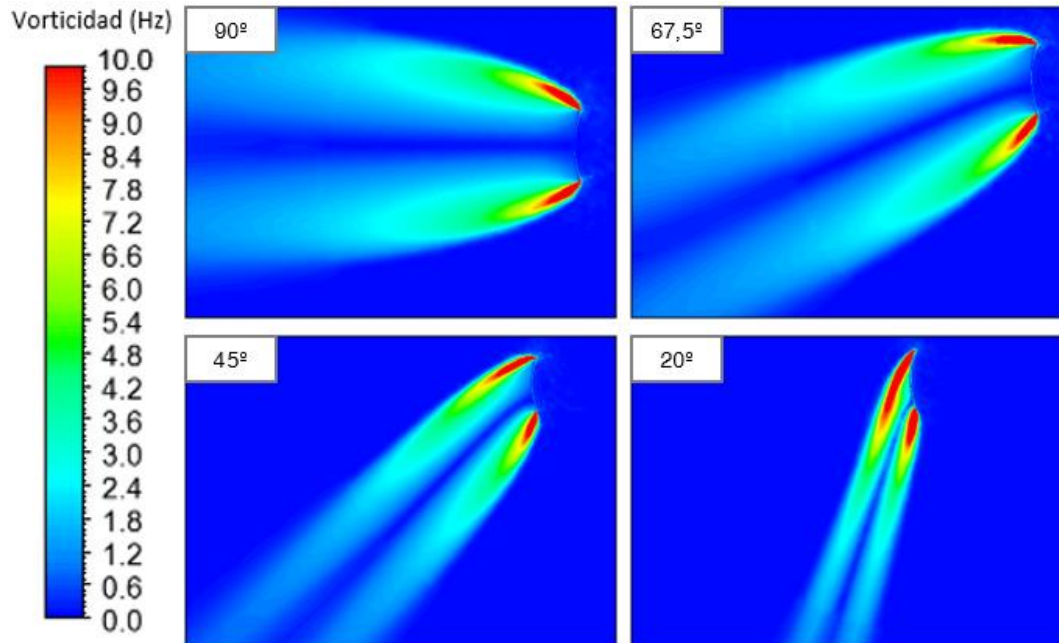


Figura 4. 31: Contornos de vorticidad cerca del perfil de la vela 1.

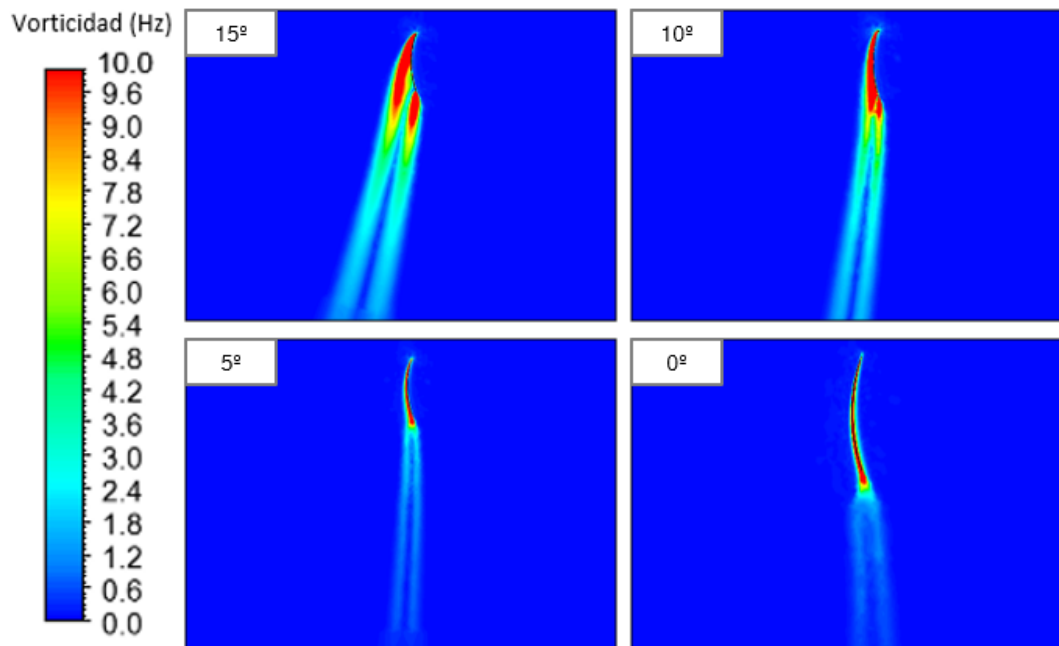


Figura 4. 32: Contornos de vorticidad cerca del perfil de la vela 2.

Respecto al tema de los rangos asignados a la leyenda en los contornos de vorticidad, se debe expresar que los valores máximos de vorticidad realmente son mucho mayores en todos ellos, pues están comprendidos entre diez mil y veinte mil hercios. Estos existen en zonas muy pequeñas y decrecen muy bruscamente en áreas muy próximas, por lo que, cogiendo una escala cercana a ese orden de magnitud, no es posible observar nada. Dicha

situación nos llevó a escoger esta escala, pero hay que pensar que las zonas coloreadas de rojo intenso tienen, en general, valores mucho mayores a los diez hercios.

Antes de explicar lo que se observa en los contornos, cabe recordar el significado de encontrar altos o bajos valores de vorticidad en un fluido. La vorticidad indica cómo es de rotacional un fluido, girando más las partículas fluidas incrementan su vorticidad, y desplazándose sin rotar, se anula.

Analizando las figuras en su conjunto, se advierte que para los ángulos más elevados de α_a , las partículas fluidas procedentes de los bordes del perfil generan la vorticidad más acusada. Estas partículas la generan justo después de atravesar dichos bordes.

Se aprecia también como, la orientación de las estelas con los valores más elevados de vorticidad, vienen influidos por la curvatura del perfil de la vela en los bordes y el ángulo de entrada del aire.

Según el ángulo del aire va decreciendo, se percibe como las dos estelas generadas en los bordes del perfil se van aproximando, hasta acabar superponiéndose en ángulos de entrada de aire menores.

El tamaño de las estelas se mantiene hasta un ángulo de entrada de aire de unos quince grados, a partir de ahí, disminuye.

4.3.6. Líneas de corriente

Líneas de corriente en diversos ángulos de α_a :

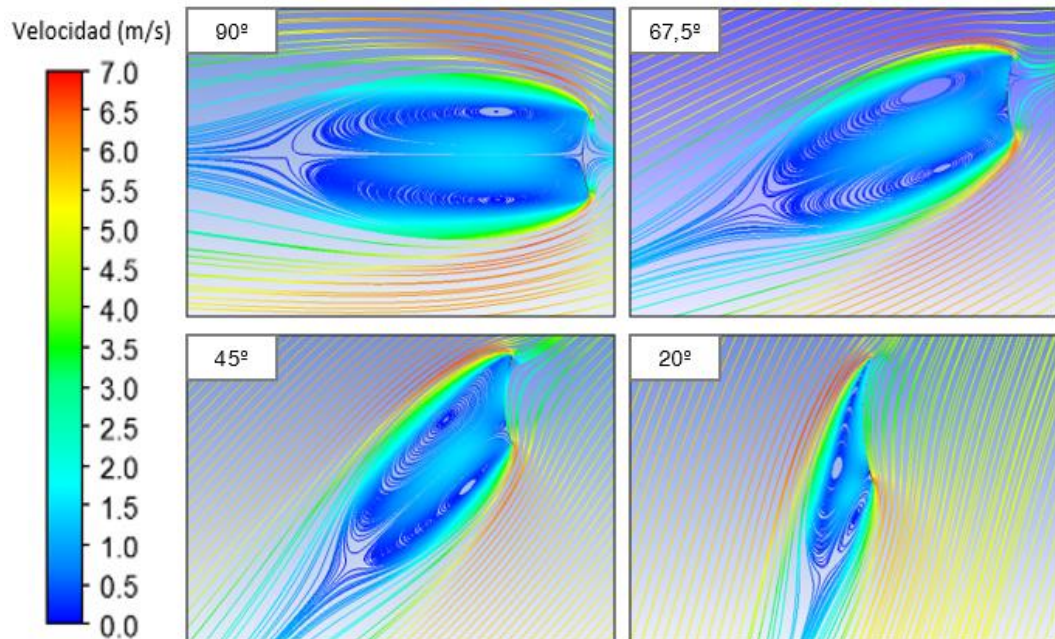


Figura 4. 33: Líneas de corriente cerca del perfil de la vela 1.

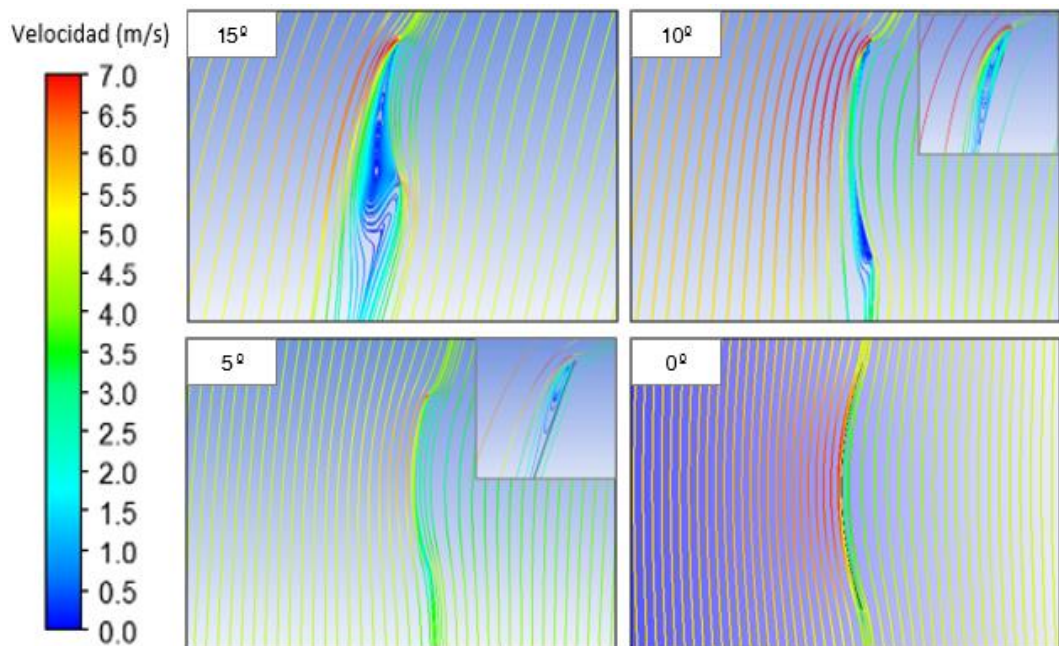


Figura 4. 34: Líneas de corriente cerca del perfil de la vela 2.

Del rango de la escala no hay que comentar nada nuevo, ya que es el mismo que el usado en los contornos de velocidad.

Explicar también que, para las líneas de corriente a cinco y diez grados, se ha ampliado la zona superior del perfil de la vela. Realizándose esto, para poder apreciar el pequeño torbellino generado en esa localización.

Mirando las siluetas, se aprecia la generación de torbellinos en la zona del extradós del perfil en todas ellas, excepto para cero grados. En cero grados no acontece porque esa zona ya no está a sotavento.

Los torbellinos son de mayor tamaño para los ángulos mayores, decreciendo según el ángulo va disminuyendo. La velocidad en metros por segundo es muy baja en todos los torbellinos.

Como es lógico, la orientación de los torbellinos está influida por la dirección de entrada de aire, generándose en las zonas que están a resguardo del viento.

Estas figuras además ayudan, junto a los contornos de presión y velocidad, a explicar el porqué del aumento de la velocidad en secciones anexas a las de sotavento. Se puede percibir como las líneas de corriente tienen que sortear los torbellinos, teniendo que recorrer mucha más distancia que en otras posiciones.

Asimismo, se comprende por la misma razón anterior, la causa de tener la velocidad máxima total a grados de entrada de aire bajos. Ya que, en la parte superior del perfil de la vela se generan pequeños torbellinos, y es justo en las zonas adjuntas a los torbellinos, donde existe la velocidad máxima.

Desglosando la explicación por ángulos de entrada de aire, apuntar que para noventa grados se generan dos grandes torbellinos. Éstos son simétricos respecto al eje horizontal, ubicándose a la altura central del perfil de la vela. La simetría, con el eje horizontal, también la cumple el resto del flujo. Todo esto es algo esperado debido a la simetría geométrica de la situación.

En las líneas de corriente a sesenta y siete grados y medio, y a veinte, se continúa teniendo dos torbellinos, pero el inferior va decreciendo según disminuye α_a .

Para quince grados, ya sólo existe el torbellino superior, volviéndose a crear dos, de nuevo, para diez grados, pero ya cada uno de mucho menor tamaño.

Por último, en cinco grados sólo tenemos uno en la parte superior del perfil, no existiendo ya en cero grados.

4.3.7. Gráficos de presión en el perfil de la vela

Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela en diferentes ángulos de α_a :

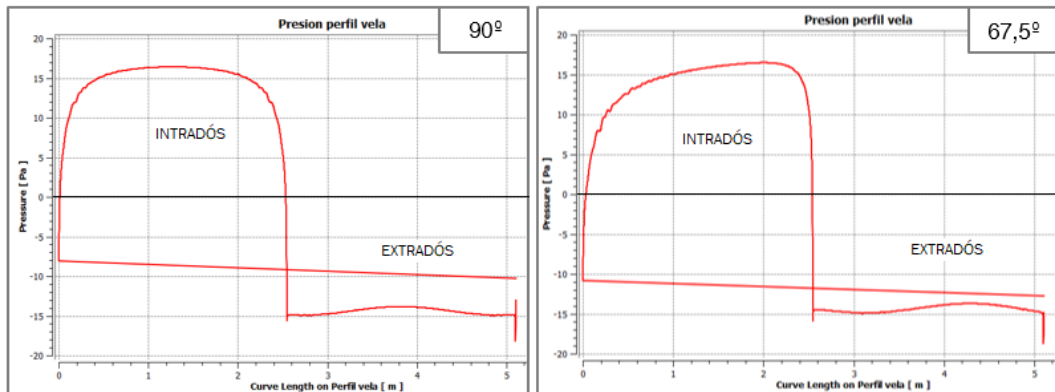


Figura 4. 35: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 1.

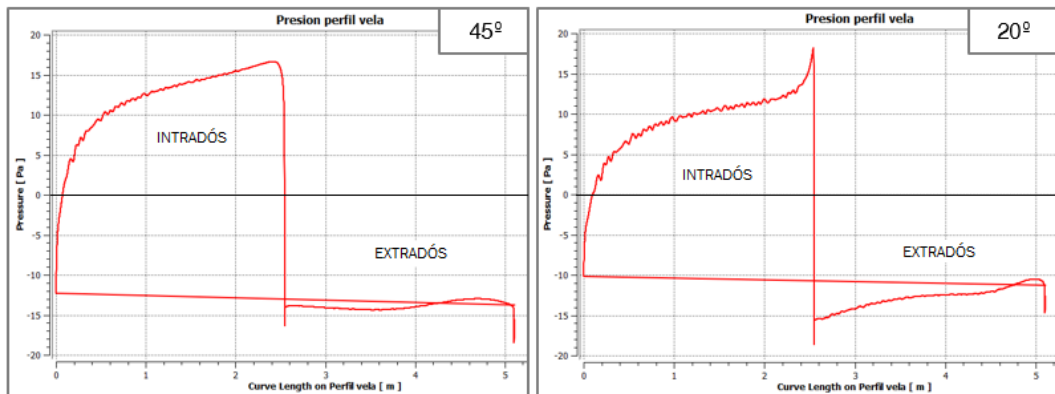


Figura 4. 36: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 2.

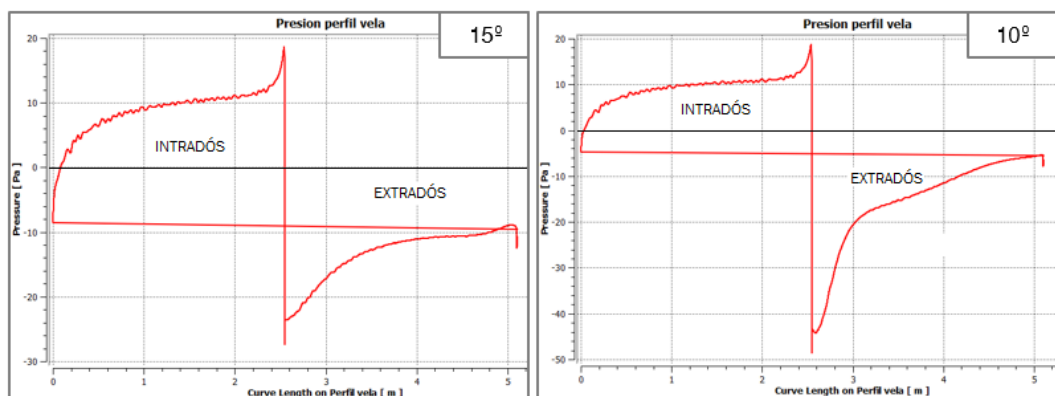


Figura 4. 37: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 3.

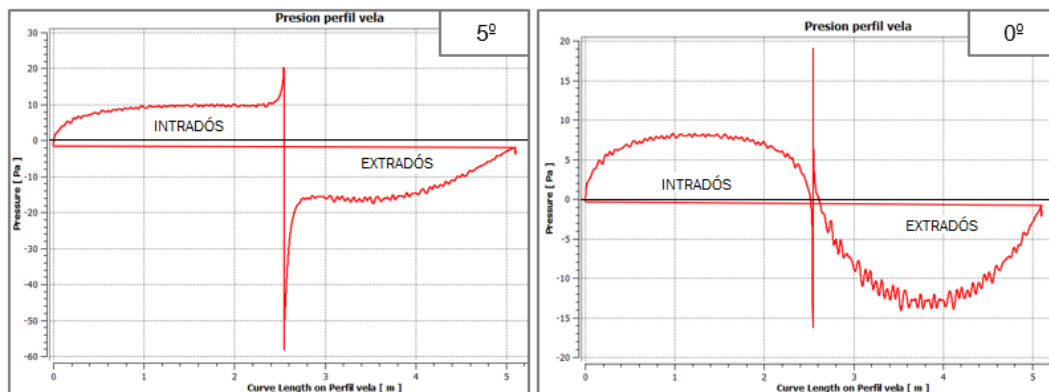


Figura 4. 38: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 4.

Los gráficos mostrados, complementan a los contornos de presión presentados precedentemente. Los gráficos dan una información, mucho más precisa, de los valores de la presión manométrica a lo largo del perfil de la vela.

Los valores de presión expuestos representan las cuatro caras del perfil de la vela como una línea cerrada. Desde el inicio del eje “x” hasta una longitud de dos metros y medio, corresponde a la cara interna de la curvatura del perfil de la vela, la que está, para ángulos de aire positivos, a barlovento.

Seguidamente hay una zona muy estrecha, de dos milímetros de espesor, donde cambia muy bruscamente el valor de la presión en el perfil. En esta sección, se localizan, en casi todas las ocasiones, los valores máximos y mínimos de presión en la gráfica. La zona corresponde geoméricamente a la anchura del perfil de la vela, en su zona superior.

Posteriormente viene la cara del extradós del perfil. Se prolonga hasta que el eje “x” vale poco más de los cinco metros. Puesto que el último tramo es muy estrecho, esto es lo mismo que decir hasta el final, prácticamente.

Por último, queda la sección de dos milímetros de espesor, correspondiente geoméricamente al ancho del perfil en su zona inferior. Se distingue de la anterior por el salto de presión existente en este tramo el dibujo.

La línea que une las presiones del punto final y el inicial en el perfil de la vela, sólo significa que esos puntos están conectados, al ser un perfil cerrado.

Como ya se comentó en los contornos de presión, se aprecia que el valor máximo absoluto en los gráficos de presión corresponde a valores negativos del mismo. Están siempre localizados en la zona superior de la cara a sotavento, pero decrecen rápidamente.

Observando las figuras, se puede distinguir como los áreas bajo la curva, respecto al valor nulo de presión, en el extradós e intradós son similares para ángulos de aire mayores a veinte grados, es decir, el área de la zona de presiones positivas (la correspondiente al intradós) y el área de la zona de presiones las negativas (la correspondiente al extradós) son parejas. A partir de los veinte grados es mayor el área de la zona negativa que de la positiva,

es decir, el extradós contribuye en mayor medida a la existencia de una diferencia de presión entre las caras del perfil de la vela.

El análisis del área bajo la curva en el perfil de presiones tiene bastante importancia, pues la fuerza generada en el perfil está directamente relacionada con dicha área. En este estudio del área bajo la curva, la diferencia de presiones entre el extradós y el intradós es lo fundamental. De hecho, la suma absoluta de la diferencia de presiones entre las caras del perfil de la vela, a lo largo de todo el perfil, es lo que genera la fuerza en la vela.

En este caso, como las presiones son de signo distinto a cada lado del perfil (exceptuando en alguna pequeña zona explicada a continuación), para calcular la fuerza generada hay que sumar las dos áreas bajo la curva del perfil. La expresión matemática que relaciona las fuerzas generadas con el área bajo la curva del perfil es la fórmula 2.3.

Las pequeñas secciones, donde las presiones tienen el mismo signo a cada lado de la vela, son:

- Una pequeña zona al inicio del perfil, en el intradós, existiendo tan sólo desde los noventa hasta los diez grados.
- La zona central de la gráfica, la del final del intradós e inicio del extradós, existiendo tan sólo a cero grados y especialmente con ángulos de entrada de aire negativos (Figura Anexo. 1).

En estas secciones se restarían las áreas para calcular la fuerza, perdiendo eficacia. Esto último, se aprecia muy bien en el gráfico de presión en el perfil a menos cinco grados (Figura Anexo. 2). En dicho gráfico, la sección en la cual se restan las áreas se hace tan grande que la fuerza en el perfil de la vela es prácticamente nula.

Al mirar el conjunto de las gráficas de presión en el perfil, es percibido que la suma de las áreas bajo la curva es mayor para ángulos de entrada de aire mayores, decreciendo al disminuir dichos ángulos. Por tanto, la fuerza generada en el perfil de la vela es mayor para los ángulos elevados, donde el aire entra más frontalmente sobre el perfil de la vela. Esto coincide con lo explicado durante el trabajo.

Finalmente añadir que, como se puede observar en las figuras de presión en el perfil, la media de diferencia de presiones, a lo largo del perfil de la vela, entre el intradós y el extradós no supera los veinte o treinta pascales, incluso en las situaciones de entrada de aire más favorables. Sin embargo, a la hora de realizar la generación del modelo, se tomó una diferencia de presiones a lo largo del perfil de la vela constante e igual a cien pascales.

La decisión de tomar esos valores para la presión, aunque sea lejana a la obtenida tras los cálculos, no influye en los resultados alcanzados, puesto que no modifica la geometría del perfil de la vela.

Para fundamentar la anterior afirmación, hay que retroceder hasta el apartado 3.2, donde es explicado el modelo de Excel que genera la forma del perfil. En dicho apartado se distingue, al mirar las ecuaciones 3.12 y 3.13, cómo no se usa la presión para calcular la posición a verificar del punto final del perfil.

También se puede ver en las ecuaciones 3.16 y 3.17, donde se calculan las posiciones de todos los puntos de la vela, cómo no aparece directamente la presión, pero sí θ_i . Para calcular el ángulo θ_i (ecuación 3.15), que es el ángulo del perfil de la vela en cada punto respecto de su cuerda, se utiliza la presión en cada punto.

En este proyecto, se ha decidido que la presión en cada punto fuese constante. La presión aparece en la ecuación en un cociente, dividida por una tensión también constante. La tensión es modificada anteriormente en la hoja Excel para mantener el valor de este cociente e ir aproximándose al punto final del perfil requerido.

Por lo que, lo único que modifica el valor de la presión, tomado en la generación del modelo, es el valor de la tensión, no la geometría del perfil de la vela. Los resultados del proyecto no varían al no cambiar la geometría del perfil de la vela.

5. Conclusiones y trabajos posteriores

5.1. Conclusiones

En esta sección se presentarán las conclusiones del presente trabajo, divididas en tres subapartados. En una primera fase, el proyecto ha consistido en la generación de un modelo, por lo que de todo ese proceso se ha querido extraer unas primeras conclusiones.

Más adelante, tras simular el modelo creado, se han obtenido una serie de datos para estudiar el comportamiento del velero ante las fuerzas aerodinámicas existentes en el mismo. De esta segunda fase se obtendrán otras conclusiones.

Por último, se han analizado contornos y líneas de corriente alrededor del perfil de la vela, esto ha aportado un conocimiento fluidodinámico de la situación, generando un último tipo de conclusiones.

5.1.1. Conclusiones de la generación del modelo

Son las siguientes:

- El ángulo de giro de la vela creado con el objetivo de poder girar la vela no se ha usado. No se ha eliminado porque será útil en posibles futuros proyectos, cuando se añada otra vela al modelo. De esta manera es posible simular distintas posiciones relativas entre las velas.
- Se podría optimizar la macro en Excel parando directamente cuando el error fuese nulo, o aproximadamente nulo. Añadiendo una serie de condiciones, como son la de máximas iteraciones a realizar y la de acotar el valor del ángulo θ_0 y tensión T para evitar la divergencia, se aseguraría que el cálculo no fuese demasiado pesado computacionalmente o se generaran errores.
- Crear cotas parametrizadas en Catia permite obtener fácilmente diversas configuraciones del perfil de la vela en un mismo "Part".
- Lo más ordenado, sencillo y flexible, a largo plazo, para poder utilizar infinitas formas del perfil de la vela es crear una spline parametrizada en Catia, cargando los valores de los parámetros de una hoja Excel en forma de tabla. Si se importa la spline que genera el perfil de la vela en Excel directamente a Catia, esta no puede ser fácilmente modificada ni parametrizada.
- La geometría podría haberse intentado realizar en Catia en su totalidad.
- Crear un sketch para generar los ejes y las caras que separen el dominio fluido es de gran ayuda. Esto va a permitir controlar el mallado, pudiendo generar una malla de más calidad y mucho más adaptada a tus necesidades. También posibilita variar la posición de las condiciones de

contorno en los ejes de entrada y salida del dominio, sin necesidad de volver a mallar.

- Aunque no se ha conseguido tener un mallado estructurado en la cara circular del dominio más próxima a la vela, como la dirección del aire va ir variando, la opción de tener un mallado triangular en esa zona tampoco es mala.
- Tener un dominio fluido grande con las condiciones de contorno muy lejos del perfil de la vela, junto con la elección del modo de turbulencia “intensidad y longitud de la escala” y la selección de un algoritmo de resolución de tipo acoplado, facilitan la convergencia del modelo.
- Un modelo de turbulencia sencillo como el Spalart-Allmaras y un tipo de flujo básico con densidad y viscosidad constante, ahorran tiempo de cálculo y dan una precisión suficiente para el problema que se quiere abordar.
- Cuando se generan fuerzas periódicas es necesario simular el modelo en transitorio para obtener unos resultados adecuados. En este caso, las fuerzas son constantes para la mayor parte de los ángulos de aire estudiados, por lo que el modelo se simuló en estacionario principalmente.
- El modelo viscoso elegido (Spalart-Allmaras) tiene un buen comportamiento para los valores de y^+ con los que se ha trabajado, aunque no da la posibilidad de elegir el modelo de tratamiento de pared.
- Se ha conseguido obtener unos resultados muy buenos para todos los ángulos de aire, con residuales bajos y coeficientes que convergen.
- Se ha logrado el objetivo inicial de crear una herramienta flexible para el estudio del flujo de aire, sirviendo para todo tipo, número y posición de velas y toda clase de veleros.
- Si se quiere simular con este modelo un velero de dimensiones significativamente diferentes al estudiado, sería necesario reajustar el mallado para optimizarlo.
- Los valores de la presión en cada punto tomados en la generación del modelo no influyen en los resultados obtenidos, puesto que no modifican la geometría del perfil de la vela, tan sólo su tensión.
- En proyectos posteriores es necesario realizar un proceso iterativo, consistente en obtener los perfiles de presión en ambas caras de la vela y utilizarlos como entrada al modelo de cálculo del perfil de la vela.

5.1.2. Conclusiones del comportamiento del velero a través del estudio de las fuerzas aerodinámicas

Estas conclusiones se enumeran a continuación:

- De “Fx” y “Fy”, la mayor fuerza generada es “Fx”, minorándose ésta, según α_a decrece.
- Las curvas de avance y deriva siguen una distribución parabólica, cercana a la de una circunferencia, hasta llegar a una perturbación en forma de pico, donde decaen rápidamente hacia el origen de coordenadas
- Las fuerzas de avance alcanzan valores mayores según aumenta α_b , es decir, cuando el barco va más a favor del viento
- Si el barco va totalmente en contra del viento no se conseguirá ningún avance positivo.
- Si el barco navega totalmente a favor del viento es posible encontrar una posición óptima, con máxima fuerza de avance y nula deriva.
- Para posiciones intermedias no es posible encontrar una posición óptima, adoptando soluciones de compromiso.
- En general, para vientos favorables serán necesarias menores fuerzas de deriva para maximizar el avance, siendo más sencillo maximizarlo.
- Con vientos fuertes, aunque es posible alcanzar una mayor velocidad, existe más fuerza de deriva, siendo más difícil poder llegar a la posición con máxima fuerza de avance.
- Los resultados están basados en un perfil de vela rígido, permitiendo presiones mayores en el extradós que en el intradós sin que la vela se deforme.
- Hasta cien grados:
 - o Los valores de fuerza de avance tienden a maximizarse en la zona del resalte.
 - o En las posiciones de máximo avance α_a es aproximadamente constante, teniendo el aire un ángulo de entrada similar al de entrada al perfil, minimizando así los desprendimientos de flujo.
 - o Esta configuración corresponde al funcionamiento de la vela en situaciones donde la fuerza de sustentación tiene más peso que la fuerza de resistencia.
 - o Las posiciones de máximo avance son próximas a las reales, pero en la práctica las velas no son rígidas, por lo que tienen un α_a algo mayor (un α_v algo menor, más cazada), evitando así deformarse con el aire incidente.
- A partir de ciento veinte grados:
 - o Las posiciones con máxima fuerza de avance no se dan en la zona del resalte y α_a va aumentando para cada serie.

- El perfil de la vela pasa progresivamente de trabajar de una forma aerodinámica, donde la fuerza de sustentación es protagonista, a otra en la cual el aire choca con la vela de forma frontal para impulsar el barco, donde la fuerza de resistencia tiene todo el peso.

5.1.3. Conclusiones fluidodinámicas del flujo alrededor del perfil

Las conclusiones fluidodinámicas son presentadas seguidamente, ordenadas según los diferentes tipos de variables estudiadas durante el proyecto.

La velocidad:

- Su distorsión aumenta cuando incide más perpendicularmente en el perfil.
- Disminuye en zonas cercanas al perfil situadas a su derecha, y es inferior, aún, en las de su izquierda que están a sotavento.
- Aumenta en las áreas cercanas al extradós del perfil situadas a su izquierda y que no están a sotavento.
- Su incremento viene influenciado por tener que sortear la curvatura de la vela y los torbellinos.

La presión:

- En las zonas cercanas al perfil emplazadas a su derecha, la presión es más alta que en las de su izquierda, por lo que el barco se moverá hacia la izquierda para las posiciones estudiadas.
- La mayor diferencia de presión es para ángulos de α_a elevados, por lo que la fuerza generada será mayor en esas configuraciones.
- Para ángulos de α_a mayores a veinte grados, el área bajo la curva es similar en el intradós y en el extradós. A partir de los veinte grados es mayor en el extradós.
- Las presiones son en general de signo distinto a cada lado del perfil, exceptuando alguna pequeña zona a ángulos concretos.

Las estelas de la vorticidad:

- En los ángulos más elevados de α_a , las partículas fluidas procedentes de los bordes del perfil, al atravesarlos, generan la vorticidad más acusada.
- Su orientación viene influida por la curvatura del perfil de la vela en los bordes y α_a .
- Según α_a va decreciendo, las estelas se van aproximando, hasta superponerse.
- Su tamaño se mantiene hasta un α_a igual a quince grados, a partir de ahí disminuye.

Los torbellinos:

- Son de mayor tamaño para ángulos mayores.
- Su velocidad en metros por segundo es muy baja.
- Su orientación está influida por α_a , existiendo en las zonas a sotavento del perfil.

5.2. Trabajos posteriores

El proyecto descrito en el documento tiene una serie de limitaciones, enumeradas anteriormente en el apartado 1.5. Pero basándose en el mismo, es posible estudiar configuraciones más realistas y complejas del 470 en el futuro. Por dicha razón, se explican, a continuación, los principales trabajos futuros a realizar. Con ellos, se intentarán representar la influencia de los distintos controles y elementos del velero.

Antes de estudiar otros componentes del velero, lo prioritario es profundizar en la vela mayor, simulando formas distintas y más realistas del perfil. Con este objetivo es interesante:

- Cambiar la curvatura del perfil manteniendo su simetría, tensando más o menos la vela. Se consigue variando la longitud de la cuerda de la vela respecto de la longitud del perfil de la vela.
- Cambiar la curvatura del perfil rompiendo su simetría. Para ello, hay que variar las presiones a lo largo del perfil, no siendo ya constantes en la vela, mediante iteraciones. Obteniendo así, una forma de vela más realista.

Una vez hecho lo anterior, es imperativo investigar el resto de velas del 470 y su interacción entre ellas. De las velas que componen el barco, la preferente es el foque, ya que junto con la mayor son las dos velas principales del navío, pero sería recomendable analizar el spinnaker también. Dentro de este apartado, habría que estudiar las posiciones relativas entre ellas, ángulos especialmente.

Para completar la investigación sobre el flujo del aire alrededor de las velas del 470, sería una buena idea examinar los efectos aerodinámicos del mástil sobre la vela, simular la vela a diferentes alturas e incluso hacer validaciones prácticas si es posible, como ensayos en túneles de viento.

Además, no se debe olvidar que en la navegación existen dos fluidos que considerar, y el agua aún no ha sido analizada. Por tanto, es indispensable experimentar con las fuerzas hidrodinámicas producidas en el velero, simulando la quilla.

6. Bibliografía

- ANSYS, Inc. (2015). *ANSYS Help*. Canonsburg, Pennsylvania, EE. UU.
- Cases, P. J. (2014). *Estudio del flujo en la tobera del motor cohete J-2S mediante técnicas CFD* (Trabajo de fin de grado). Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- CFDNINJA. (2017, 29 11). *ANSYS MESHING–Bias Factor*. Recuperado de CFDNINJA:
<https://cfd.ninja/bias-factor>
- Cloos, A. (2017, 24 11). *Curso de navegación a vela*. Recuperado de Escuela de vela Nicolás Dasso:
<http://www.optinic.com.ar/apuntes/PRINCIPIANTES/syc.htm>
- de Pieri, J. S. (2016). *Vertical Axis Wind Turbine (Part 1)*. Recuperado de Cornell University:
<https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=333371302>
- Díaz, E. (2017, 24 11). *Cómo comenzar a Navegar a Vela*. Recuperado de Grupo DICODI:
<https://www.dicodi.com/como-comenzar-a-vela/>
- Favarim da Silva, C. R., & Rodrigues Dias, E. S. (2013). *Análise das condições de escoamento em uma vela de barco usando dinâmica computacional de fluidos* (Trabajo de clase). Campinas, São Paulo, Brasil: Universidade Estadual de Campinas.
- Figueroa, N. (2011). *Estática y Dinámica del Buque*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Flórez González, C. A. (2011). *Prototipo de vela rígida principal para la regata de la copa América 2013 según regla AC72* (Trabajo de fin de grado). Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Gerritsen, M., Crook, A., Doyle, T., Shankaran, S., Collie, S., Coutris, J.-E., Abbott, B., Hanson, D. (2003). *An Explanation of Sail Flow Analysis*. Recuperado de Stanford University :
<http://syr.stanford.edu>
- Gómez, B. (2014). *Estudio del plano vélico y procedimiento de diseño de las velas. Aplicación al velero escuela "Barcelona"* (Trabajo de fin de grado). Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- González, O. M. (2001). *Análisis estructural*. Ciudad de México, México: Limusa.
- Irausquin, A. (2012). Bernoulli vs Newton: Teorías sobre el origen de la sustentación. *XLV Aniversario de la Facultad de Ingeniería Mecánica UC*. Conferencia llevada a cabo en el congreso de la Universidad de Carabobo, Naguanagua, Carabobo, Venezuela.

- Lago, D. (2014). *Estudio CFD de una bomba de torbellino. Evaluación de modelos de turbulencia* (Trabajo de fin de grado). Vigo, España: Universidade de Vigo.
- Lopes Gamboa, F. J. (2014). *Análise Numérica das Características Aerodinâmicas de uma Vela Rígida Aplicando Dinâmica dos Fluidos Computacional* (Trabajo de fin de grado). Lisboa, Portugal: Universidade Técnica de Lisboa.
- Marchaj, C. (1975). *Sailing Theory and Practise*. Londres, Inglaterra: Adlard Coles.
- Masuyama, Y., Tahara, Y., Fukasawa, T., & Maeda, N. (2007). Database of Sail Shapes vs. Sail Performance and Validation of Numerical Calculation for Upwind Condition. *The 18th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*. Simposio llevado a cabo en el congreso de SNAME, Annapolis, Maryland, EE. UU.
- North Sails. (2016). *Puesta a Punto 470*. San Fernando, Buenos Aires, Argentina: North Sails Sudamérica.
- Offshore Racing Congress. (2016a). ORC Velocity Prediction Program Documentation 2016. *Offshore Racing Congress*. Barcelona, España.
- Offshore Racing Congress. (2016b). Reglamento International Measurement System 2017. *Offshore Racing Congress*. Barcelona, España.
- Offshore Racing Congress. (2016c). Sistema de Ratings ORC 2017. *Offshore Racing Congress*. Barcelona, España.
- Offshore Rating Congress. (2009). ORC Stability & Hydrostatic Datasheet Explanation. *Offshore Racing Congress*. Busan, Corea del Sur.
- Parra, M. T. (2013). *Mecánica de Fluidos Computacional*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
- Pereira, D. (2005). *Cuaderno Técnico Clase 470*. Lisboa, Portugal: Federación Portuguesa de Vela .
- Reguera, J. (2014). *Manual práctico de navegación a vela*. Recuperado de publicconsulting media:
<http://www.publicconsulting.com/wordpress/navegarvela/>
- Singladuras Náuticas Canaleras. (2017, 24 11). *Navegación a vela*. Recuperado de Singladuras Náuticas Canaleras:
<http://singladurasnauticas.yolasite.com/navegacionvela-cs-1.php>
- Tizón, J. M. (2008). *Seminario de simulación numérica en sistemas de propulsión*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- White, F. M. (2010). *Mecánica de Fluidos*. Madrid, España: Mc Graw Hill.
- Kariger, E. (2018, 15 01). *Notas sobre la Navegación a Vela en Cruceros*. Recuperado de Apuntes de Náutica:
<http://nauticakike.blogspot.com.es/2011/02/notas-sobre-la-navegacion-vela-en.html>

Anexo

Contornos de velocidad

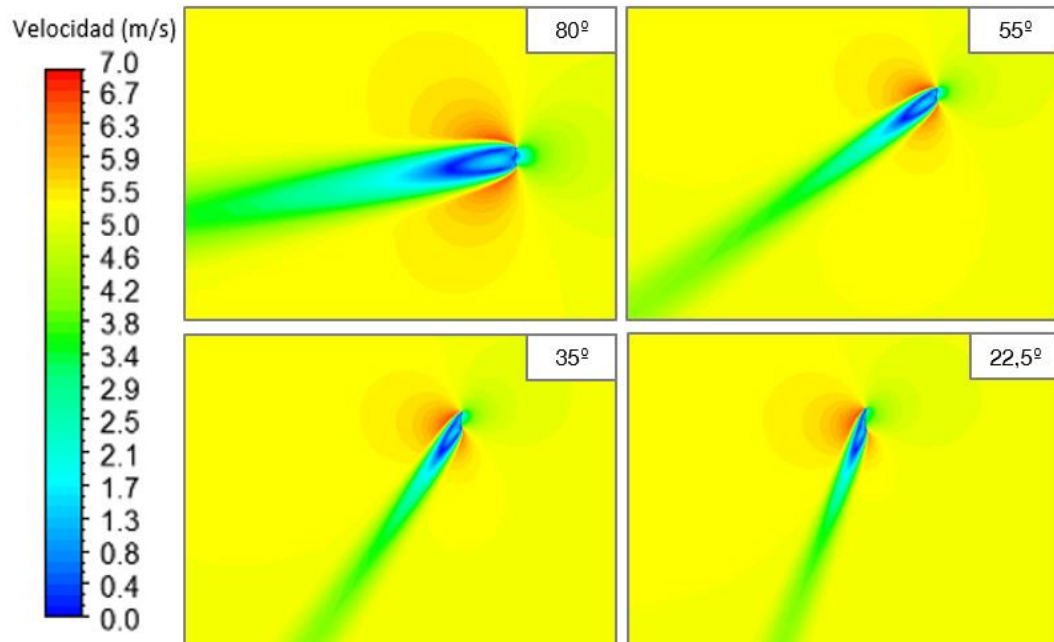


Figura Anexo. 3: Contornos de velocidad cerca del perfil de la vela 3.

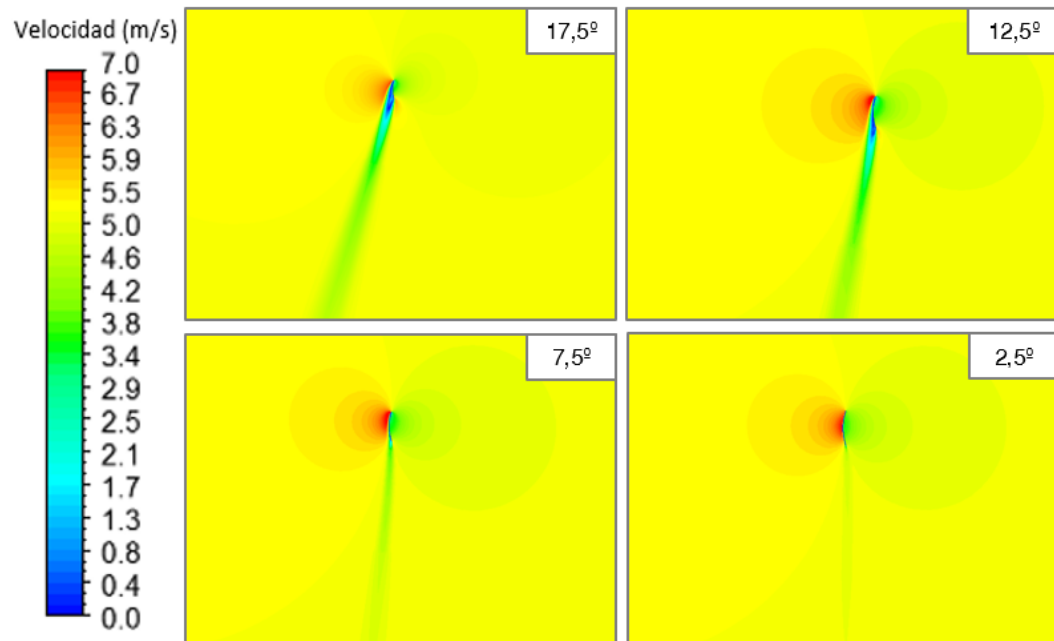


Figura Anexo. 4: Contornos de velocidad cerca del perfil de la vela 4.

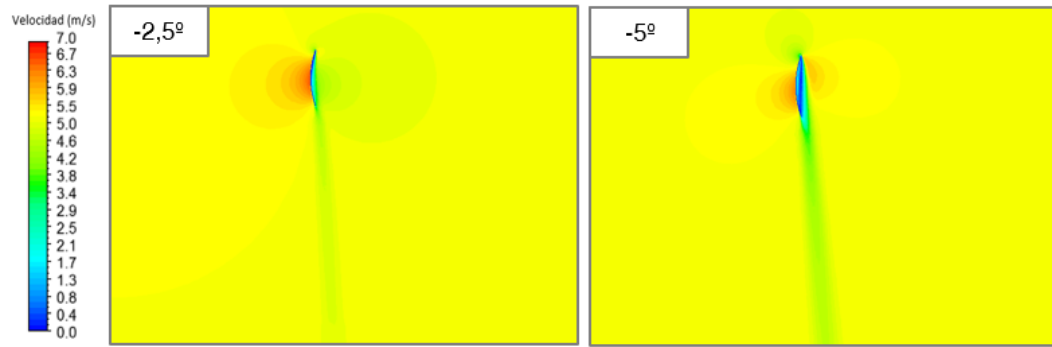


Figura Anexo. 5: Contornos de velocidad cerca del perfil de la vela 5.

Contornos de presión

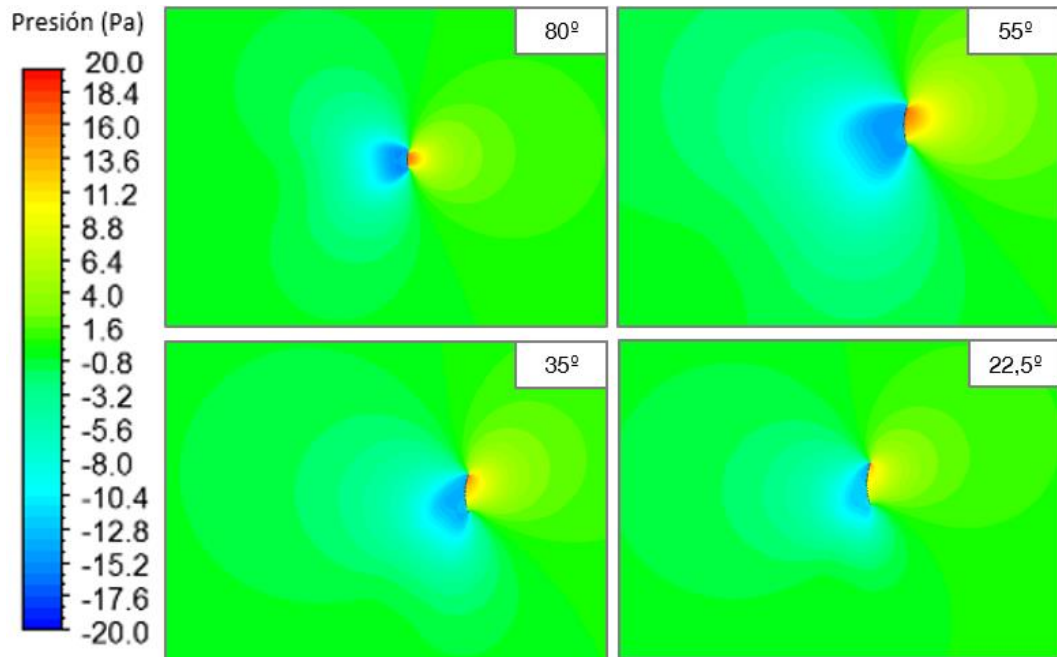


Figura Anexo. 6: Contornos de presión cerca del perfil de la vela 3.

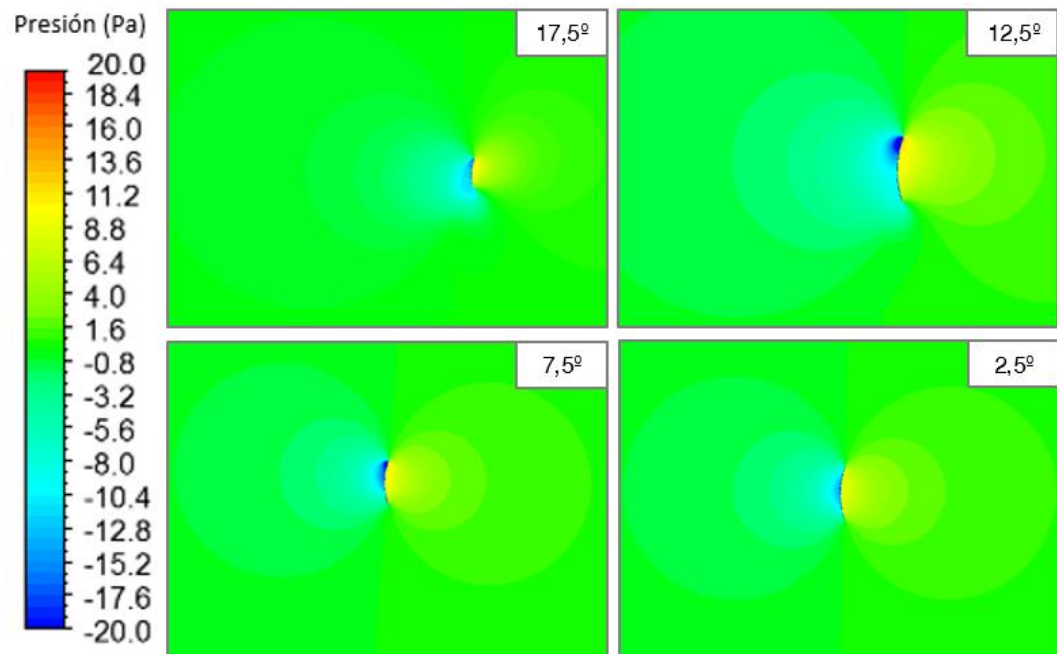


Figura Anexo. 7: Contornos de presión cerca del perfil de la vela 4.

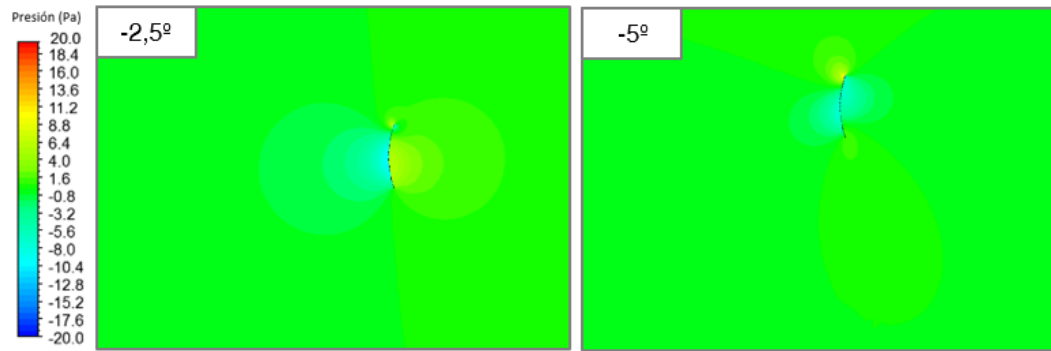


Figura Anexo. 8: Contornos de presión cerca del perfil de la vela 5.

Contornos de vorticidad

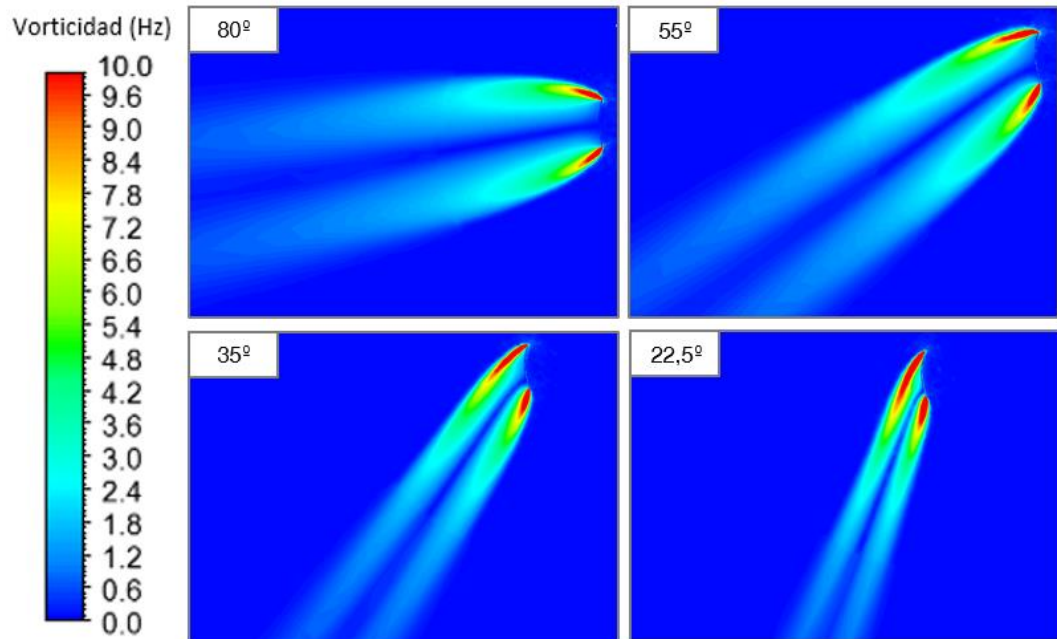


Figura Anexo. 9: Contornos de vorticidad cerca del perfil de la vela 3.

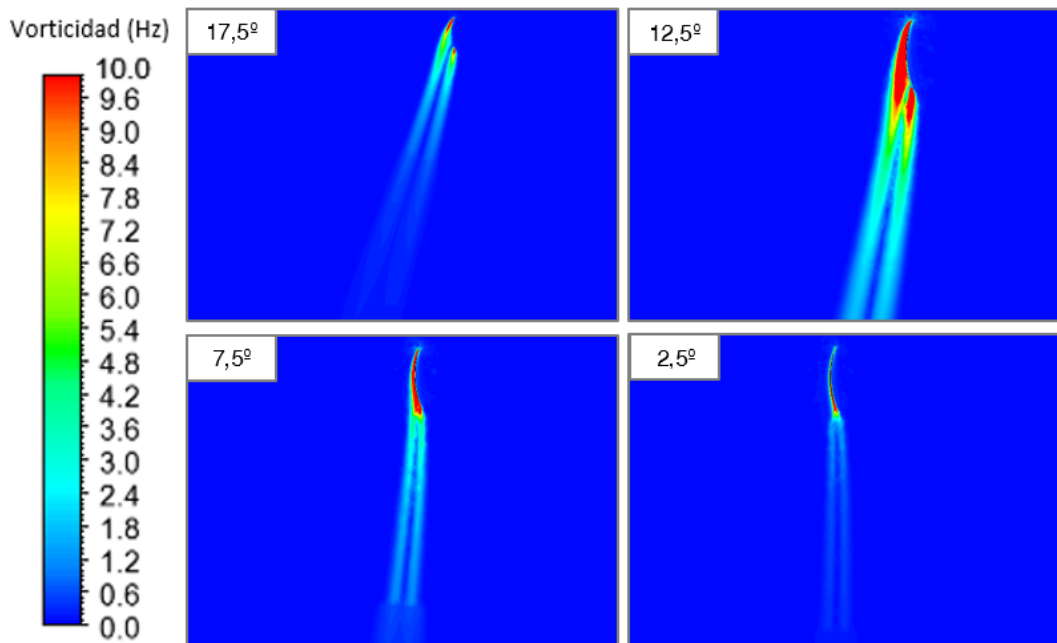


Figura Anexo. 10: Contornos de vorticidad cerca del perfil de la vela 4.

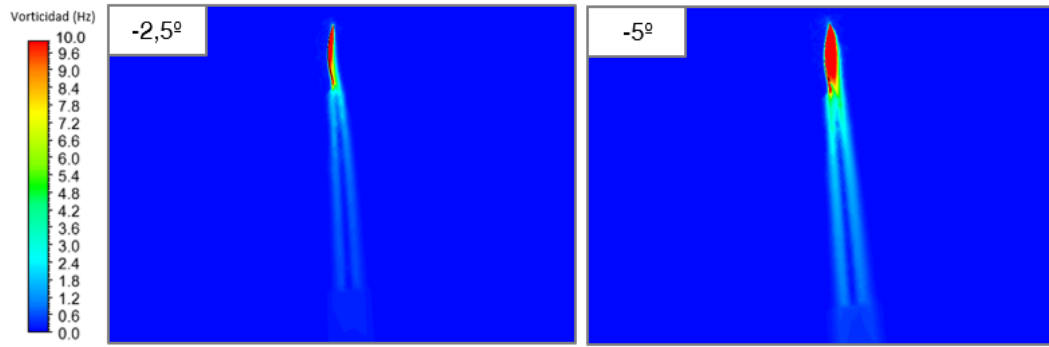


Figura Anexo. 11: Contornos de vorticidad cerca del perfil de la vela 5.

Líneas de corriente

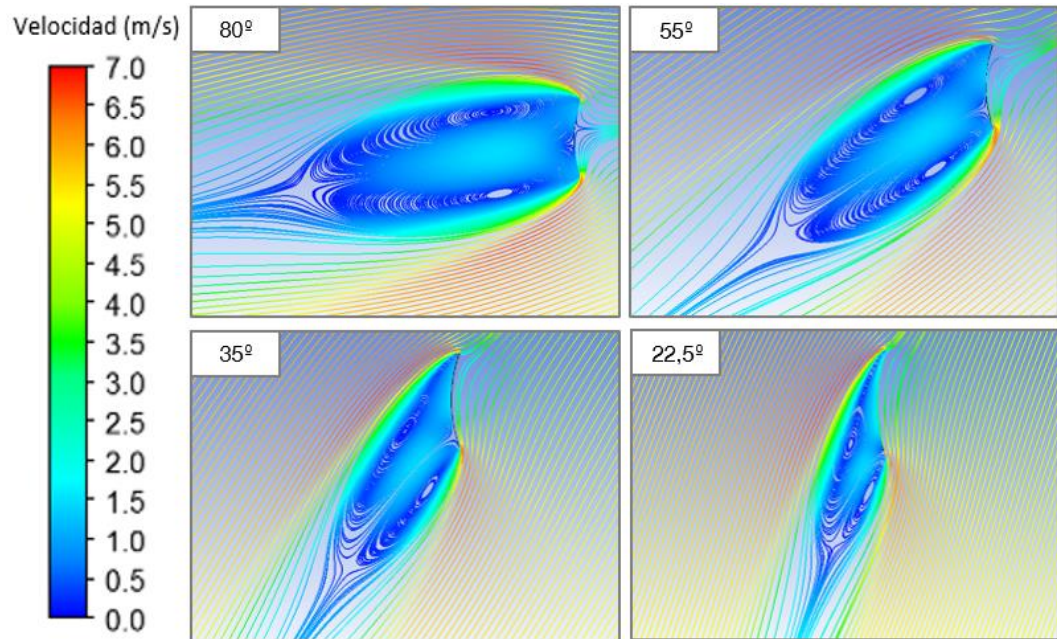


Figura Anexo. 12: Líneas de corriente cerca del perfil de la vela 3.

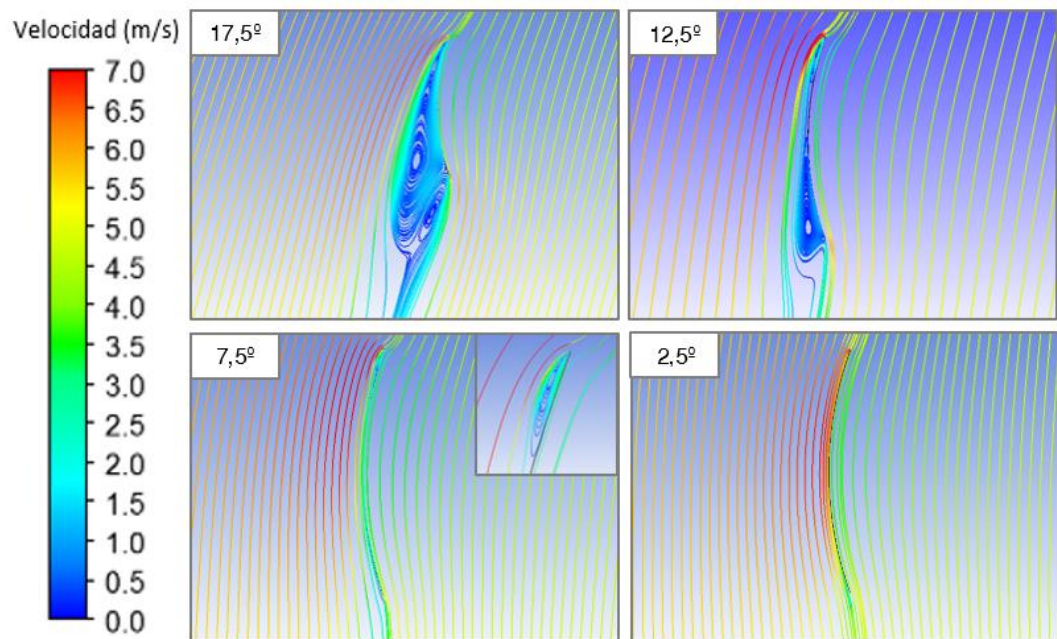


Figura Anexo. 13: Líneas de corriente cerca del perfil de la vela 4.

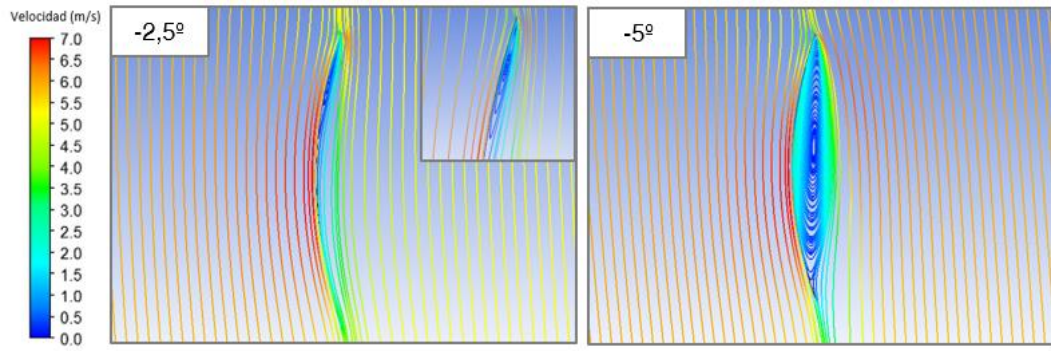


Figura Anexo. 14: Líneas de corriente cerca del perfil de la vela 5.

Gráficos de presión en el perfil de la vela

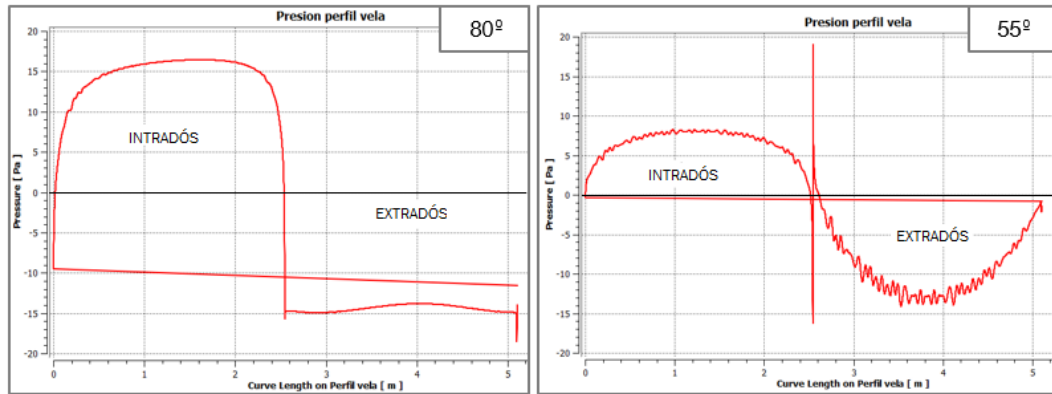


Figura Anexo. 15: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 5.

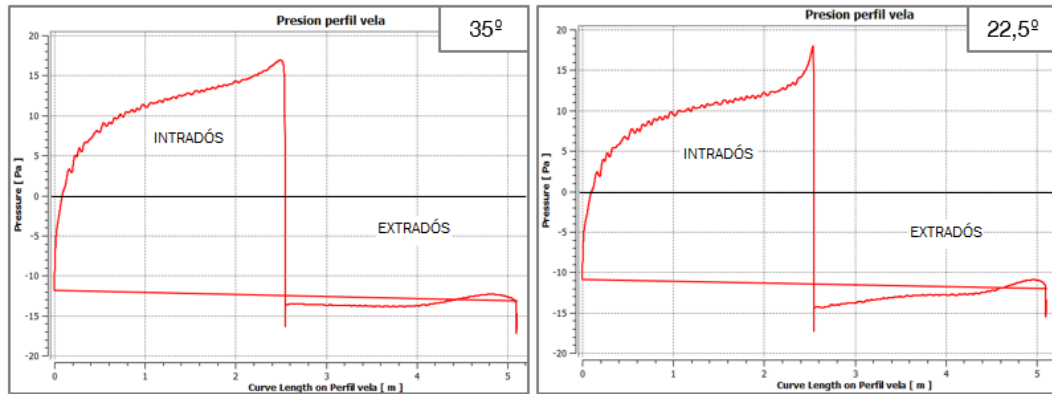


Figura Anexo. 16: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 6.

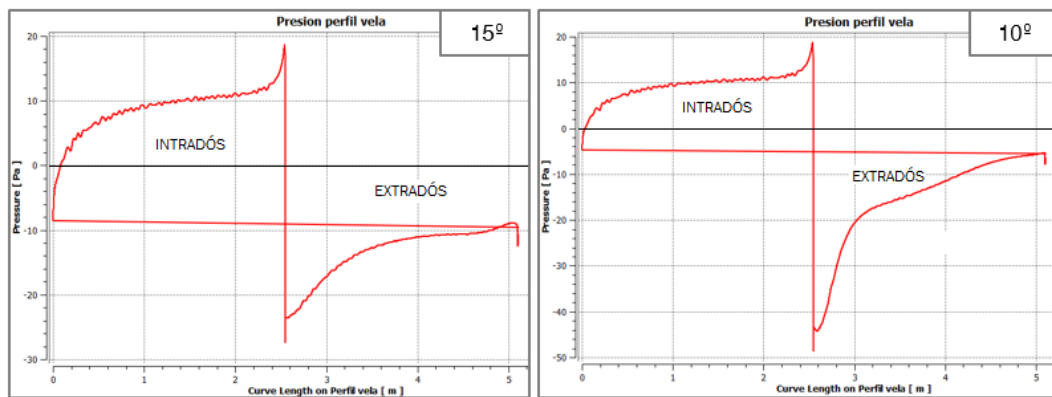


Figura Anexo. 17: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 7.

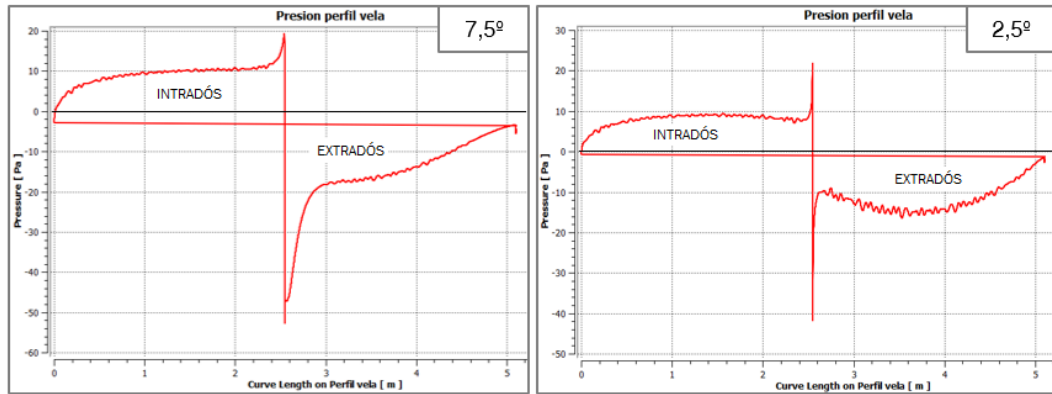


Figura Anexo. 18: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 8.

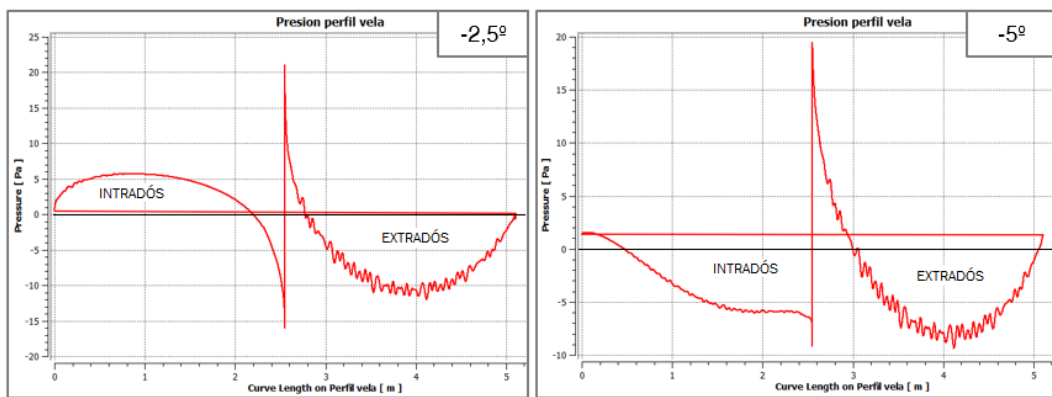
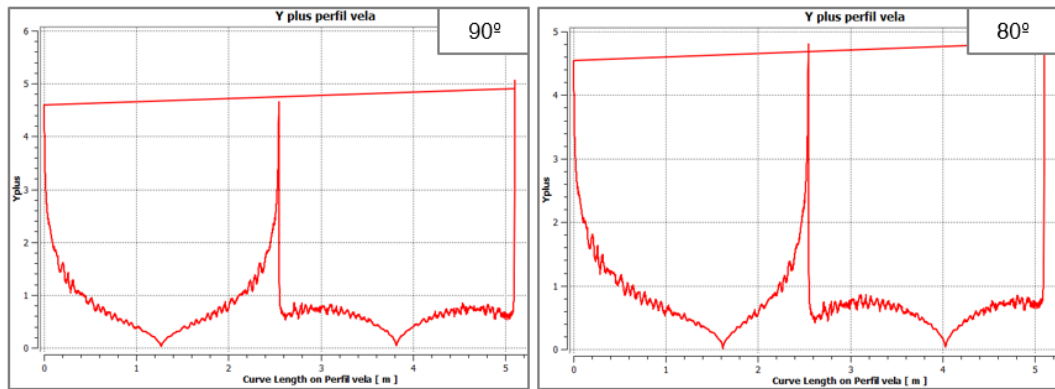
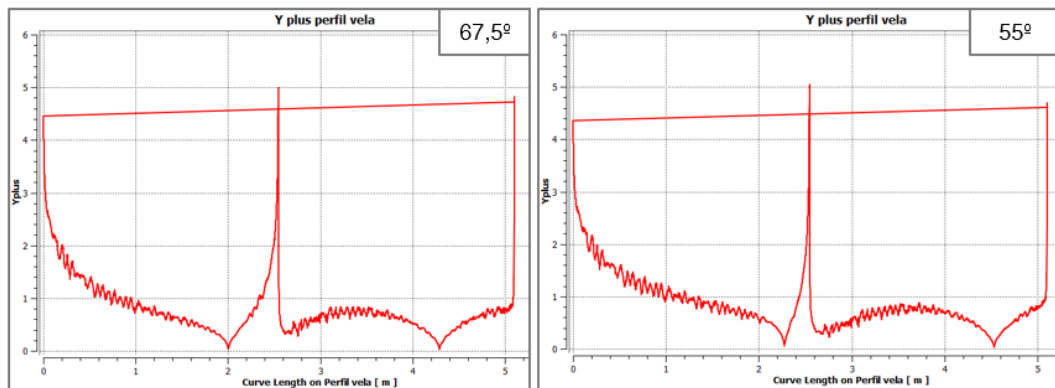
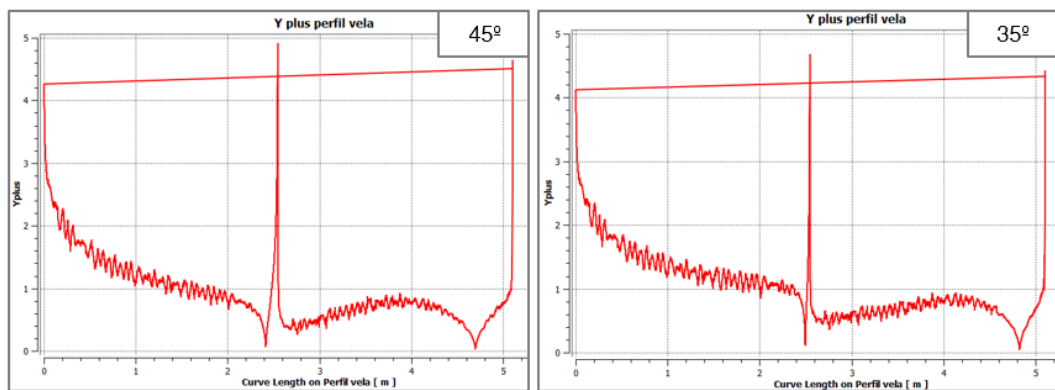


Figura Anexo. 19: Gráficos de presión a lo largo del perfil de la vela 9.

Gráficos de Y^+ en el perfil de la velaFigura Anexo. 20: Gráficos de Y^+ a lo largo del perfil de la vela 1.Figura Anexo. 21: Gráficos de Y^+ a lo largo del perfil de la vela 2.Figura Anexo. 22: Gráficos de Y^+ a lo largo del perfil de la vela 3.

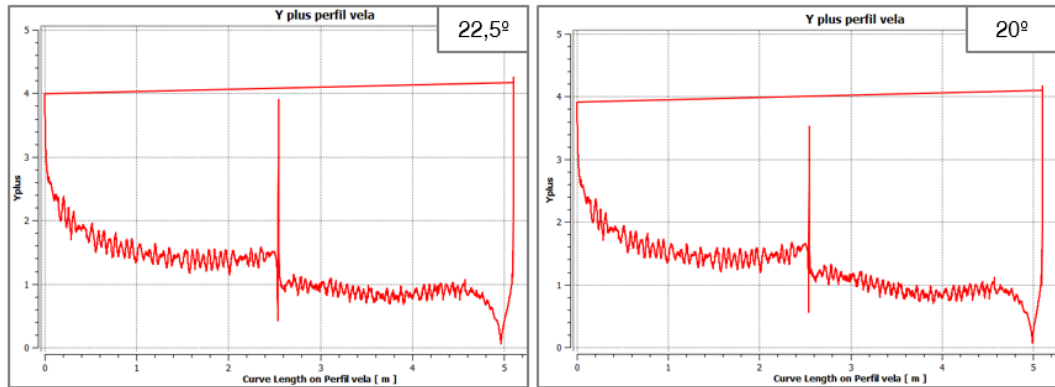


Figura Anexo. 23: Gráficos de Y+ a lo largo del perfil de la vela 4.

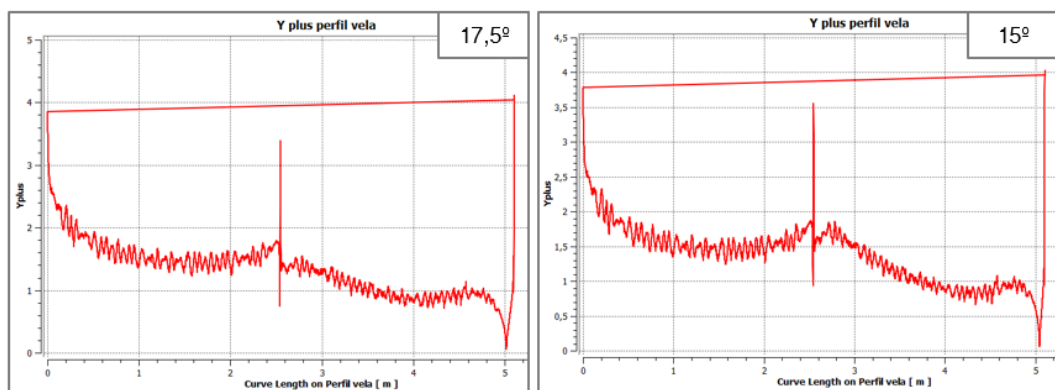


Figura Anexo. 24: Gráficos de Y+ a lo largo del perfil de la vela 5.

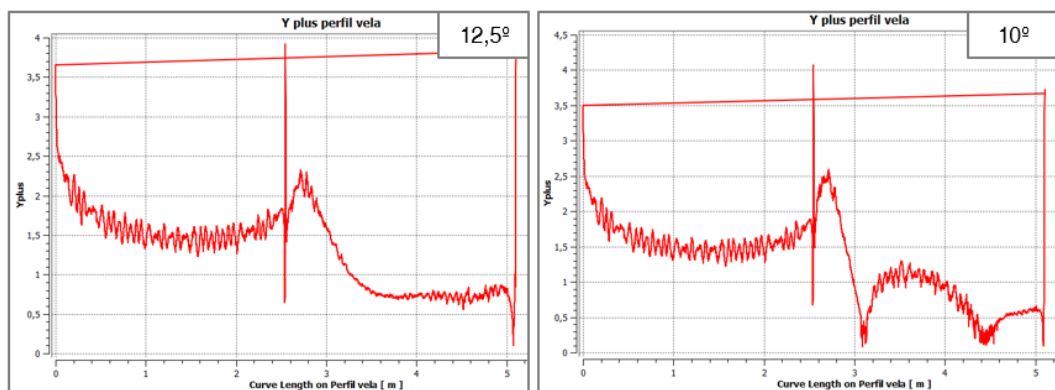


Figura Anexo. 25: Gráficos de Y+ a lo largo del perfil de la vela 6.

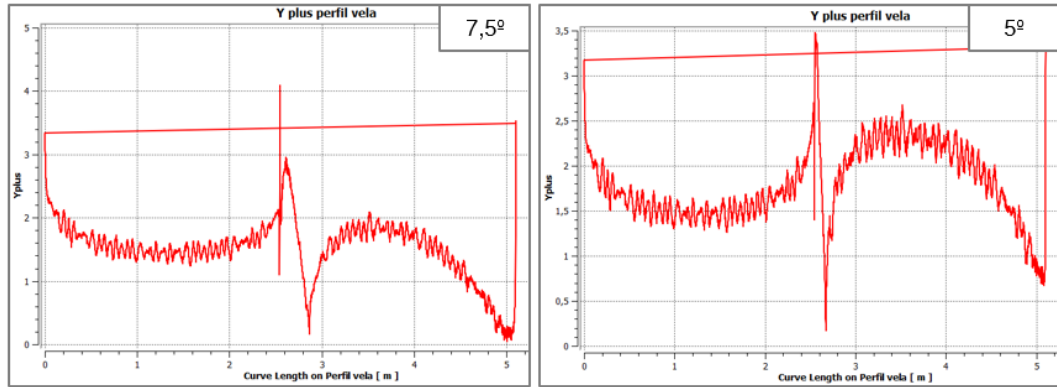


Figura Anexo. 26: Gráficos de Y+ a lo largo del perfil de la vela 7.

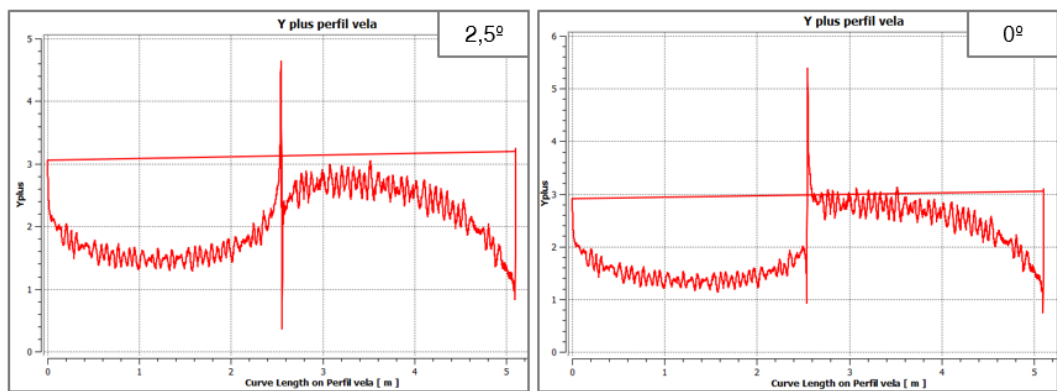


Figura Anexo. 27: Gráficos de Y+ a lo largo del perfil de la vela 8.

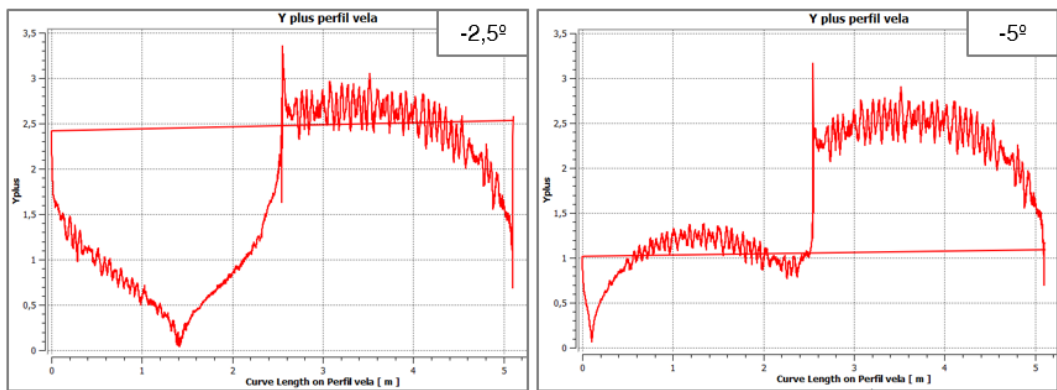


Figura Anexo. 28: Gráficos de Y+ a lo largo del perfil de la vela 9.

