



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Determinación de los perfiles y de las fuerzas
aerodinámicas en velas de barco mediante CFD-
2D**

Autor: D. Rodrigo Del Campo Estrada
Tutor: D. Andrés Melgar Bachiller

Valladolid, Septiembre, 2018

Resumen

En este proyecto se analizó, en dos dimensiones y haciendo uso de técnicas CFD, el flujo de aire alrededor de dos velas de barco velero. Para ello se diseñó una herramienta completa de cálculo iterativo semi-automática. La geometría de las velas es generada un modelo teórico realimentado con los resultados de presión obtenidos en las simulaciones, todo ello integrado en un programa ejecutable. El flujo es resuelto en ANSYS Fluent. La herramienta creada es flexible, permitiendo establecer diversos parámetros de reglajes de las velas.

Finalmente se ha hecho un estudio modificando diferentes parámetros de trimado, buscando las posiciones de vela óptimas en términos de generación de fuerzas aerodinámicas, investigando para ello la interacción entre ambas velas.

Palabras clave:

Aerodinámica, velas de barco, CFD, mallado automático, cálculo iterativo.

Abstract

This project study, in two dimensions and using CFD technics, air-flow around two sails from a sailing boat. In order to develop the model, a complete semi-automatic and iterative calculation tool is designed. Sail's geometry is generated by a theoretical feedback model through the pressure results derived from simulations, all of that's integrated in an executable program. Air-flow is solved by ANSYS Fluent. The created tool is flexible so as to set different sail's parameters and variables.

Different sailing parameters have been studied, looking for the optimum sail's position in terms of aerodynamics forces generation, researching for that both sails interaction.

Keywords:

Aerodynamic, sail boat, CFD, automatic mesh, iterative simulation

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres y a mis hermanos por su apoyo durante toda esta etapa académica que hoy culmina.

Agradezco a mi tutor Andrés Melgar el acompañamiento, la ayuda y el buen humor durante la realización del proyecto.

Finalmente, me gustaría agradecer a mis amigos y compañeros de clase, especialmente a Álvaro, Diego y Pablo por la ayuda prestada.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Estructura	1
1.2	Antecedentes y justificación.....	1
1.3	Objetivos.....	2
2.	FUNDAMENTOS DE LA NAVEGACIÓN A VELA	3
2.1	Definiciones y conceptos básicos	3
2.2	Principio físico de funcionamiento de las velas.....	5
2.3	Fuerzas presentes en un velero.....	6
2.4	Velero clase 470.....	8
3.	MODELO DE CÁLCULO CFD DE VELAS	11
3.1	Modelo de generación de la geometría de la vela	11
3.1.1	Fundamentación teórica	11
3.1.2	Resolución de la ecuación diferencial	12
3.1.3	Condiciones de contorno de las velas	13
3.1.3.1	Condiciones de contorno de la vela mayor	13
3.1.3.2	Condiciones de contorno del foque.....	14
3.1.4	Macro y código C++	16
3.1.4.1	Modelo en Excel.....	16
3.1.4.2	Código C++	21
3.2	Simulación 2D en ANSYS Fluent	30
3.2.1	Geometría en Design Modeler	32
3.2.2	Generación de la malla.....	35
3.2.2.1	Mapeado del dominio fluido con refinamiento interior (<i>Body Sizing</i>).....	37
3.2.2.2	Mallado en la proximidad de las velas (<i>Inflation</i>)	38
3.2.2.3	Refinamiento del mallado según la dirección longitudinal de los contornos (<i>Edge Sizing</i>)	40
3.2.2.4	Definición de las secciones	41
3.2.2.5	Conclusiones del modelo de mallado	41
3.2.3	Modelo en Fluent	42
3.2.3.1	Aspectos generales del modelo	43
3.2.3.2	Flujo simulado	44
3.2.3.3	Valores de referencia (<i>Reference Values</i>)	44
3.2.3.4	Condiciones de contorno (<i>Boundary Conditions</i>).....	44

3.2.3.5	Modelo de turbulencia	46
3.2.3.6	Algoritmo de resolución e inicialización del cálculo	47
3.2.3.7	Procedimiento del cálculo y condiciones de convergencia	48
2.2.3.8	Generación de los ficheros de presión resultados	50
4.	MANUAL DE USUARIO	51
4.1	Inicialización de la generación de la geometría	51
4.2	Ejecución del programa de generación de perfiles	53
4.3	Lanzamiento de los cálculos CFD	54
4.4	Criterio de parada de la cadena de cálculo	55
5.	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	59
5.1	Planteamiento de las simulaciones realizadas	59
5.2	Estudio de la vela mayor	62
5.3	Estudio del reglaje del foque en el modelo de dos velas	67
5.3.1	Rango de longitudes de escota estudiado	67
5.3.2	Fuerzas de navegación	68
5.4	Estudio del reglaje de la vela mayor en el modelo de dos velas	73
5.4.1	Fuerzas de navegación	74
5.4.2	Conclusiones del estudio de dos velas	76
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS POSTERIORES	77
6.1	Conclusiones	77
6.2	Perspectivas y trabajos posteriores	79
	ANEXO I – Resultados estudio longitud de la escota	83
	ANEXO II – Resultados estudio ángulo de la botavara	89

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 Direcciones náuticas y principales elementos del velero [1]	3
Ilustración 2 Denominación de los rumbos de navegación respecto a la dirección del viento [1]	4
Ilustración 3 Cazar y filar una vela [1]	4
Ilustración 4 Contorno extradós e intradós de una vela	4
Ilustración 5 Capa límite sobre un perfil de la vela [1]	6
Ilustración 6 Fuerzas presentes en el velero [9]	7
Ilustración 7 Representación del velero de la clase 470 junto con algunas dimensiones de interés [1]	8
Ilustración 8 Generación del perfil de la vela [1]	11
Ilustración 9 Resolución numérica perfil de una vela	13
Ilustración 10 Perfil de la vela mayor para una configuración determinada.....	14
Ilustración 11 Perfil del foque para una configuración determinada	15
Ilustración 12 Reglajes para el foque	17
Ilustración 13 Perfil del foque generado con modelo Excel, con identificación del error en el ángulo de salida.....	17
Ilustración 14 Macro en Visual Basic para el perfil del foque	18
Ilustración 15 Reglajes de la vela mayor	19
Ilustración 16 Perfil de la vela mayor generado en Excel, con identificación del error en X y error en Y.....	19
Ilustración 17 Macro en Visual Basic para el perfil de la mayor	20
Ilustración 18 Perfiles de vela generados con el modelo en Excel. a) Perfil del foque b) Perfil de la vela mayor	21
Ilustración 19 Esquema de entradas y salidas del código desarrollado	22
Ilustración 20 Especificaciones fijadas en el archivo de configuración "path_cfg.txt"	23
Ilustración 21 Formato del fichero de resultados de ANSYS Fluent de presión estática del intradós de la vela mayor.....	24
Ilustración 22 Identificación de los errores en α y de longitud de la botavara, utilizados en el modelo de generación del perfil de la mayor en el código C++	26
Ilustración 23 Contornos extradós e intradós de una vela de espesor "a"	28
Ilustración 24 Esquema de la orientación del velero en las simulaciones CFD	28
Ilustración 25 Formato fichero de coordenadas generado por el código, compatible con Design Modeler	30
Ilustración 26 Workbench de ANSYS con Fluent.....	31
Ilustración 27 Alternativas en la arquitectura del proyecto. a) Fluid Flow (Fluent), b) Conjunto de componentes individuales	31
Ilustración 28 Contornos importados en Design Modeler	32
Ilustración 29 Sketch de las fronteras exteriores del volumen fluido	34
Ilustración 30 Geometría final del dominio fluido	34
Ilustración 31 Dominio fluido y superficie de refinamiento interior	35
Ilustración 32 Resultado en el árbol de operaciones de Design Modeler	35
Ilustración 33 Parámetros utilizados en la operación "Body Sizing"	37

Ilustración 34 Resultado del "Body Sizing" con detalles	38
Ilustración 35 Parámetros utilizados en la operación "Inflation"	39
Ilustración 36 Resultado de la operación "Inflation"	39
Ilustración 37 Alternativas propuestas para la mejora de la morfología del mallado en los extremos de las velas	40
Ilustración 38 Parámetros utilizados en la operación "edge sizing"	40
Ilustración 39 Resultado final de la malla generada en torno a una vela.....	41
Ilustración 40 Identificación de las secciones del volumen fluido definidas en "Meshing"	41
Ilustración 41 Interfaz de Fluent	42
Ilustración 42 Parámetros generales del modelo Fluent	43
Ilustración 43 Volumen fluido interno sin fronteras externas (contorno exterior) ni fronteras internas (contornos de las velas)	45
Ilustración 44 Condiciones de contorno fijadas en el modelo Fluent.....	46
Ilustración 45 Parámetros de discretización espacial seleccionados en el algoritmo de resolución de Fluent.....	48
Ilustración 46 Evolución de los residuales del cálculo completo con las dos etapas correspondientes a los diferentes modelos de turbulencia	49
Ilustración 47 Fichero de configuración de la simulación.....	51
Ilustración 48 Ficheros de inicialización de la presión estática para una vela (foque). a) Presión en el lado intradós, b) Presión en el lado extradós.....	52
Ilustración 49 Perfiles de la vela mayor generados en las diferentes iteraciones de cálculo efectuadas	52
Ilustración 50 Perfiles de la diferencia entre la presión del contorno intradós y el contorno extradós obtenidos en las simulaciones CFD de cada iteración	53
Ilustración 51 Activación de la opción "Refresh" para cada curva importada a partir de ficheros de texto	54
Ilustración 52 Esquema de lanzamiento de las simulaciones CFD.....	55
Ilustración 53 Evolución de la convergencia de la cadena de cálculo	56
Ilustración 54 Evolución de las presiones estáticas para distintas iteraciones. a) Diferencia de presión intradós-extradós del foque, b) Diferencia de presión intradós-extradós de la mayor	57
Ilustración 55 Longitud de las velas en la sección inferior.....	59
Ilustración 56 Esquema caso de navegación estudiado en el proyecto	60
Ilustración 57 Componentes de la fuerza aerodinámica resultante sobre las velas del velero	61
Ilustración 58 Recopilatorio de fuerzas en función del ángulo de la botavara (α) para los cálculos con una vela.....	63
Ilustración 59 Evolución de la fuerza de avance y de la fuerza de deriva para distintos ángulos de apertura de la botavara.....	63
Ilustración 60 Relación ($F_{\text{avance}}/F_{\text{total}}$) para distintas posiciones de la botavara.....	64
Ilustración 61 Perfiles y contornos de presión estática para las dos perfiles-solución encontrados con una apertura de botavara (α) de 45 grados.....	65
Ilustración 62 Detalles de las iteraciones para el caso de cálculo con una apertura de la botavara de 40 grados. a) Perfil de diferencia de presión b) Perfiles generados.....	66

Ilustración 63 Contornos de presión estática para el caso de cálculo con apertura de la botavara de 40 grados.....	66
Ilustración 64 Resumen de fuerzas sobre la vela mayor para el caso de cálculo con ángulo de botavara (φ) igual a 40 grados	67
Ilustración 65 Perfiles del foque simulados en las distintas iteraciones de cálculo para una longitud de escota de 5.50 metros	68
Ilustración 66 Recopilatorio de fuerzas en función de la longitud de la escota (L_{ESCOTA}) para los cálculos con dos velas	69
Ilustración 67 Evolución de la fuerza de avance y de la fuerza de deriva para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con una apertura de botavara constante de 40 grados.....	69
Ilustración 68 Evolución de la fuerza de avance total y de cada una de las velas para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con una apertura de botavara constante de 40 grados.....	70
Ilustración 69 Evolución de la fuerza de deriva total y de cada una de las velas para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con una apertura de botavara constante de 40 grados.....	71
Ilustración 70 Evolución del rendimiento global y de cada una de las velas para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con una apertura de botavara constante de 40 grados.....	72
Ilustración 71 Fuerza de avance del foque en función del ángulo de entrada del perfil $\theta_{0,foque}$ para la serie de cálculos realizada a $\alpha=40^\circ$	72
Ilustración 72 Fuerza de avance de la vela mayor en función del ángulo de entrada del perfil $\theta_{0,mayor}$ para la serie de cálculos realizada a $\alpha=40^\circ$	73
Ilustración 73 Recopilatorio de fuerzas en función del ángulo de la botavara (α) para una longitud de escota (L_{ESCOTA}) de 5.2 metros	74
Ilustración 74 Fuerzas de avance y de deriva totales para distintos ángulos de apertura de la botavara (α) fijando la longitud de la escota (L_{ESCOTA}) en 5,20 metros	75
Ilustración 75 Descomposición de la fuerza de avance (izquierda) y de la fuerza de deriva (derecha) en función de diferentes ángulos de botavara (α) para una longitud de escota (L_{ESCOTA}) fijada a 5.2 metros	75
Ilustración 76 Evolución del rendimiento global y de cada una de las velas para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota (L_{ESCOTA}) fija de 5.2 metros.....	76
Ilustración 77 Perfiles del foque obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con un ángulo de botavara (α) de 40°	83
Ilustración 78 Perfiles de la vela mayor obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con un ángulo de botavara (α) de 40°	83
Ilustración 79 Contorno de presión total obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con un ángulo de botavara (α) de 40° (1/2)	84
Ilustración 80 Contorno de presión total obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con un ángulo de botavara (α) de 40° (2/2)	85
Ilustración 81 Contornos de velocidad para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (1/2).....	85
Ilustración 82 Contornos de velocidad para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (2/2).....	86
Ilustración 83 Contornos de viscosidad turbulenta para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (1/2)	86

Ilustración 84 Contornos de viscosidad turbulenta para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (2/2) 87

Ilustración 85 Líneas de corriente para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (1/2)..... 87

Ilustración 86 Líneas de corriente para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (2/2)..... 88

Ilustración 87 Contornos de presión estática para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros 89

Ilustración 88 Contornos de velocidad para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros 90

Ilustración 89 Contornos de viscosidad turbulenta para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros 91

Ilustración 90 Líneas de corriente coloreadas por la velocidad para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros..... 92

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento recoge la memoria del trabajo de fin de máster (TFM) correspondiente a la titulación “Máster en Ingeniería Industrial” de la Universidad de Valladolid. El proyecto ha sido realizado en el seno del *Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica*.

1.1 Estructura

El presente documento se encuentra dividido en seis capítulos además de anexos. A continuación, se resumen brevemente el contexto de cada capítulo.

El primer capítulo responde a la introducción, donde se detallan los antecedentes, justificaciones y objetivos del proyecto.

El segundo capítulo versa sobre los conceptos básicos de navegación, los principios físicos de las velas, las fuerzas presentes en un velero, así como la presentación del velero real.

El tercer capítulo corresponde a la presentación de la cadena de cálculo concebida, comprendida por el modelo de generación de las velas y el modelo de simulación en ANSYS Fluent (geometría, mallado, configuración de los cálculos y resultados).

El cuarto capítulo presenta a modo de manual de usuario, el conjunto de pasos a seguir para simular velas con los reglajes de trimado deseados.

El quinto capítulo expondrá el planteamiento de olas simulaciones llevadas a cabo en el cuadro del proyecto, así como los resultados obtenidos.

El capítulo final se reserva para la presentación de las conclusiones del proyecto, así como las perspectivas y los futuros ejes de desarrollo a estudiar.

1.2 Antecedentes y justificación

Diversos trabajos teniendo como objeto el estudio aerodinámico de velas han sido realizados, de los cuales se introducen los más relevantes a continuación.

En primer lugar, se considera la publicación “*Una explicación del análisis del flujo de la vela*” (Guerritsen et al., 2003) [7]. Este trabajo realizado por la Universidad de Stanford tiene como objeto de estudio la simulación CFD en dos dimensiones de dos velas. Los resultados extraídos sobre una vela son validados mediante experimentación en el túnel del viento, recogiendo las presiones de la vela en su contorno.

En segundo lugar, se menciona también la publicación “*Análisis de las condiciones de flujo de una vela de barco usando dinámica computacional de fluidos*” (Favarim y Rodrigues, 2013) [8]. Se trata del estudio de una vela simétrica rígida en dos dimensiones usando técnicas CFD. El objeto de estudio son los coeficientes de arrastre (C_D) y de sustentación (C_L), siendo validados también mediante la experimentación.

Recientemente el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid, ha tutelado un proyecto de fin de grado en Ingeniería Mecánica titulado: “*Simulación mediante CFD del flujo alrededor de velas de barco*” (Peña Santiago, 2018). El proyecto tiene como objeto el estudio de las velas de un velero 470, llegando a

simular en ANSYS Fluent diferentes ángulos de incidencia del viento aparente sobre la vela mayor de la embarcación, generada previamente gracias a un modelo en Excel de deformación de velas. La principal limitación del estudio reside en la naturaleza simétrica de los perfiles de las velas.

Este trabajo ha significado el punto de partida del presente proyecto, pretendiendo avanzar, por tanto, en la simulación CFD en dos dimensiones con perspectiva a simular las dos velas de mayor importancia, la vela mayor y el foque.

El principal eje de desarrollo a seguir es la simulación CFD de geometrías de vela realistas, esto es generadas considerando las presiones estáticas a las que son sometidas. La presión estática de las velas es un resultado propio de la simulación, por lo que la metodología pasa por diseñar una cadena de cálculo en la que se itere con los perfiles de velas concebidos a partir de la solución obtenida de la simulación CFD.

El encuadre del proyecto residirá entonces en el estudio y concepción de una herramienta de cálculo capaz de iterar la geometría de las velas con unos reglajes determinados, para así poder simular perfiles realistas que permitan aumentar el conocimiento acerca de la aerodinámica de las velas.

1.3 Objetivos

Tomando como referencia el modelo desarrollado previamente [1], la naturaleza iterativa de la cadena de cálculo a concebir para la simulación de velas generadas a partir de los perfiles de presión estática implica la persecución de varios objetivos específicos:

- Creación de una herramienta de cálculo flexible para el estudio del flujo del aire en dos dimensiones para cualquier posición de las velas y toda clase de veleros.
- Desarrollo de un modelo de generación de perfiles de vela capaz de trabajar con perfiles de presión variables.
- Simplificación máxima del número de programas y útiles empleados en la cadena de cálculo.
- Conseguir el mayor grado posible de automatización en la cadena de cálculo, ya que se serán precisas múltiples iteraciones para cada caso de estudio.
- Llegar a conclusiones didácticas sirviéndose de los resultados obtenidos, aumentando así el conocimiento sobre el flujo de aire alrededor de las velas de un barco, la dinámica computacional de fluidos (CFD) y el entorno de trabajo de ANSYS.
- Estudiar la interacción de las dos velas del *velero 470*, obteniendo más datos sobre este caso concreto.

2. FUNDAMENTOS DE LA NAVEGACIÓN A VELA

El propósito de este capítulo es presentar las nociones básicas sobre la navegación a velas, adquiriendo los principales conceptos que se pondrán en práctica durante la realización del proyecto.

2.1 Definiciones y conceptos básicos

Como punto de partida, se presenta la correspondiente terminología náutica. Se presentan las direcciones cardinales de la embarcación, así como los elementos básicos del velero (ver Ilustración 1).

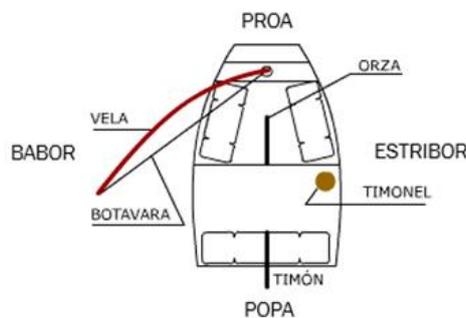


Ilustración 1 Direcciones náuticas y principales elementos del velero [1]

Se define [1]:

- *Proa*: Parte frontal de la embarcación.
- *Popa*: Parte posterior de la embarcación.
- *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 de plástico unidas con la finalidad de impulsar el velero sirviéndose del viento.
- *Botavara*: Percha horizontal que permite mantener cazado y orientado el pujamen de una vela.
- *Escota*: Cable que sirve para regular el ángulo de la vela en relación con el eje longitudinal del velero.
- *Orza o quilla*: Elemento longitudinal situado debajo del casco, que aprovecha la fuerza hidrodinámica del agua para equilibrar la fuerza de deriva ejercida sobre las velas por el viento.
- *Timón*: Elemento usado para definir la dirección de navegación o rumbo.
- *Timonel*: Persona encargada de dirigir el velero.

La dirección de navegación o rumbo dispone de diferentes denominaciones en función de la dirección del viento. De igual manera, se diferencian los casos en los que el navío está amurado a babor o por el contrario se encuentra amurado a estribor. Los distintos rumbos son presentados en la Ilustración 2.

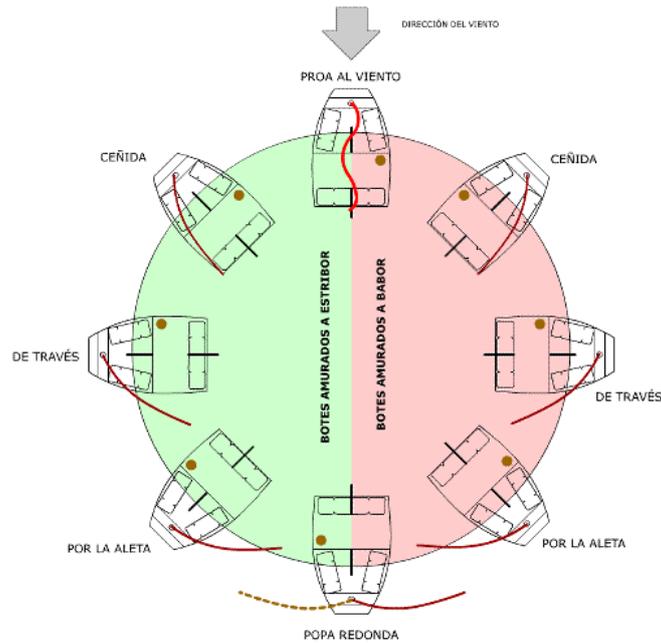


Ilustración 2 Denominación de los rumbos de navegación respecto a la dirección del viento [1]

En relación con el reglaje de las velas, se introducen dos conceptos de filar y cazar (ver Ilustración 3):

- Cazar: Acercar la vela hacia el eje longitudinal del barco.
- Filar: Abrir la vela en el sentido opuesto al eje longitudinal del barco.

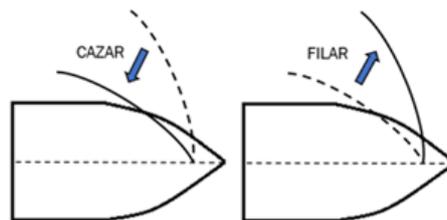


Ilustración 3 Cazar y filar una vela [1]

En la geometría de las velas, se distinguen dos contornos, el intradós y el extradós (ver Ilustración 4). El intradós es la parte cóncava del perfil, mientras que el extradós se refiere a la parte convexa.



Ilustración 4 Contorno extradós e intradós de una vela

2.2 Principio físico de funcionamiento de las velas

El fenómeno físico de la generación de la fuerza aerodinámica generada por un perfil en el seno de un flujo es explicado por diferentes teorías. Todas ellas se fundamentan en revelar el origen de la fuerza de sustentación. A continuación, se presentan tres principios [1]:

- Principio de Bernouilli.
- Tercera Ley de Newton. Principio de acción-reacción.
- Circulación. Ley de Kutta-Loukowski.

Se procede a exponer la teoría más clásica dentro de la mecánica de fluidos. Según esta explicación, el principio físico que rige el funcionamiento de una vela es el “Principio de Bernouilli”. La ecuación fundamental que describe este principio es la siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 = cte \quad (2.1)$$

Donde:

- 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 *m/s*.
- v_2 : Velocidad absoluta en la posición 2 expresada en *m/s*.
- 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 *kg/(m³)*.

Al observar la expresión (2. 1) se llega a la conclusión que, una mayor velocidad va asociada a una menor presión, y viceversa. El aumento de la velocidad en el extradós es la consecuencia de la disminución de presión, siendo la geometría de las velas la responsable de la aparición de la fuerza de sustentación.

Generación de la fuerza de sustentación

La geometría asimétrica de los perfiles aerodinámicos, en este caso las velas deformadas, permiten la formación de una zona de sobrepresión en el intradós del perfil (*pressure side*), y una zona de depresión en el contorno extradós (*suction side*). Se origina, por tanto, una diferencia de presión (ΔP) de presión dirigido desde el intradós hacia el extradós de la vela induciendo la fuerza de sustentación.

La utilización de varias velas, aunque cada una de ellas siga el mismo principio de sustentación descrito, implica una menor eficiencia aerodinámica, pues la interacción existente degrada el flujo incidente en los perfiles.

Importancia de la capa límite sobre el perfil

El desarrollo de la capa límite sobre el perfil de las velas es de vital importancia en la generación de las fuerzas aerodinámicas. Las principales pérdidas en las velas (tomando como referencia el problema en dos dimensiones) son las *pérdidas de perfil*.

La capa límite es la región situada entre un cuerpo y un fluido a lo largo de un movimiento relativo entre los dos. Los gradientes de velocidad en esta zona son importantes. Toda superficie en contacto con un flujo dispone de capa límite asociada. Las magnitudes de la capa límite, tales como el espesor de la cantidad de movimiento (ϑ^*), el factor de forma (H), la fuerza de rozamiento viscoso (τ_p) y el coeficiente de rozamiento (C_f), van a permitir caracterizar el flujo externo de las velas [2].

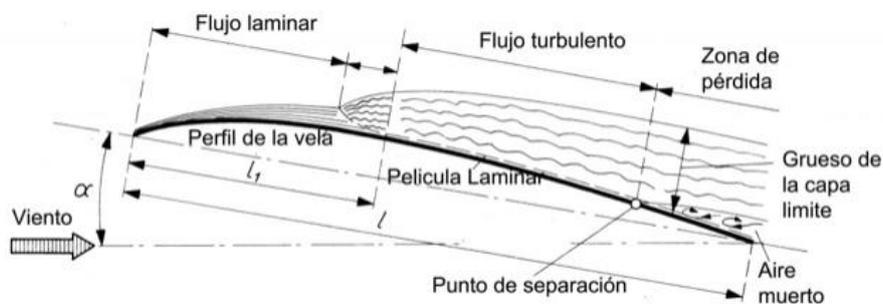


Ilustración 5 Capa límite sobre un perfil de la vela [1]

Al navegar a favor de la dirección del viento, la fuerza de resistencia toma una mayor importancia para el avance del barco, alcanzando su influencia máxima al navegar de empopada. Igualmente, es la diferencia de presión entre las dos caras de la vela, la causante del avance del velero.

2.3 Fuerzas presentes en un velero

En este apartado se detallan todas las fuerzas generadas en un velero, tanto las aerodinámicas sobre las velas, como las hidrodinámicas sobre el casco de la embarcación. Aunque el alcance del estudio realizado sólo comprende dos dimensiones, es necesario definir las fuerzas totales en las tres dimensiones, pues permitirá comprender mejor la problemática para optimizar la fuerza generada en las velas.

La principal causante de la fuerza en una vela es la fuerza de presión, definiéndose según la siguiente expresión:

$$\vec{F}_p = \iint \vec{P}_{man} \cdot (-\vec{n}) \cdot d\vec{A} \tag{2. 2}$$

Donde:

- F_p : Fuerza de presión sobre la vela.
- P_{man} : Presión manométrica.
- \vec{n} : Vector de dirección normal a la superficie de la vela.
- dA : Diferencial del área de la vela.

Las fuerzas viscosas, aunque en menor medida, también generan fuerzas sobre la vela. Las fuerzas viscosas son provocadas por la adherencia del fluido a la pared, debida a la viscosidad. Su naturaleza se define en la siguiente expresión:

$$\vec{F}_v = \iint \tau_p \cdot dA \quad (2.3)$$

Siendo:

- F_v : Fuerza viscosa de la vela.
- τ_p : Esfuerzo viscoso ($\tau_p = \left(\mu \frac{\delta u}{\delta y}\right)_{y=0}$).
- dA : Diferencial del área de la vela.

La fuerza total (F_T) es la resultante de las fuerzas de presión (F_p) y las fuerzas viscosas (F_v):

$$\vec{F}_T = \vec{F}_p + \vec{F}_v \quad (2.4)$$

El valor de las fuerzas depende de la geometría de la vela, las características del flujo, las características del fluido y del ángulo de incidencia. La fuerza resultante sobre las velas (F_T), se descompone según la fuerza de avance y de deriva, siendo de gran interés estas componentes de las fuerzas, ya que se basan en la dirección de avance de la embarcación. En la Ilustración 6 se muestran todas las fuerzas presentes en el velero.

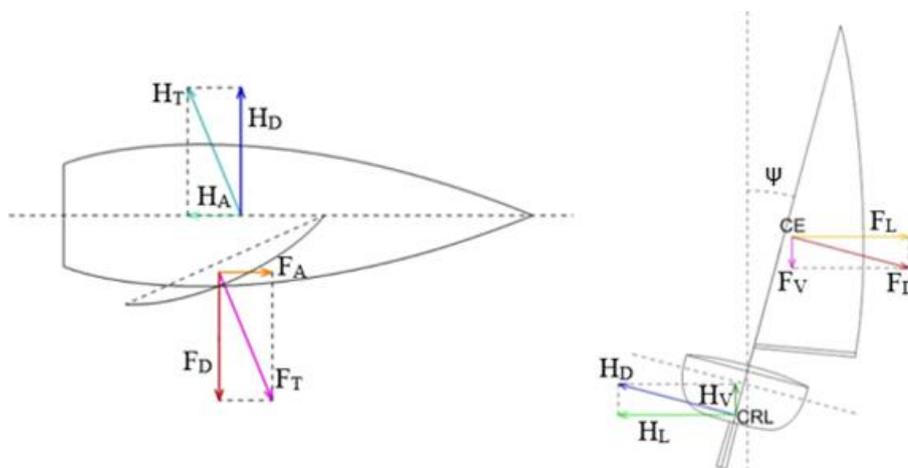


Ilustración 6 Fuerzas presentes en el velero [9]

Donde:

- 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.

A las fuerzas aerodinámicas generadas en la vela, se oponen las distintas fuerzas hidrodinámicas producidas en el caso de la embarcación. La fuerza de avance de las velas se opone a la fuerza hidrodinámica de avance del casco, siendo la diferencia entre ambas la fuerza de avance total del velero. De manera equivalente, la fuerza de deriva producida en las velas se opone a la fuerza de antideriva del casco (generada principalmente por la orza, evitando el vuelque del velero).

2.4 Velero clase 470

Las velas estudiadas en el proyecto se corresponden a las del velero de la *clase 470*. Este modelo fue diseñado en 1963 por el francés *André Cornu*, siendo reconocido en 1963 como una clase internacional y convirtiéndose en 1976 en clase olímpica [1]. Se trata de un velero pensado para dos tripulantes. Existen tres tipos de velas: *la mayor*, *el foque* y *el spinnaker* (ver Ilustración 7).

Dimensiones:

Eslora total 4.70 M
 Eslora línea flotación 4.40 M
 Manga 1.68 M
 Peso 120 kg (todo equipado)
 Mástil 6.78 M
 Botavara 2.65 M
 Tangón de spi 1.90 M
 Foque 3.58 M²
 Mayor 9.12 M²
 Sup. Véllica 12.70 M²
 Spinnaker 13.00 M²
 Peso tripulación 125 - 145 kg



Ilustración 7 Representación del velero de la clase 470 junto con algunas dimensiones de interés [1]

En trabajos previos se ha avanzado en la simulación CFD de la vela mayor [1]. El presente proyecto se fundamenta en la continuación del estudio de la vela mayor, además del foque, simulando ambas velas de forma conjunta. El spinnaker, por tanto, no es objeto de estudio, pudiendo llegar a tomar parte en futuros trabajos.

3. MODELO DE CÁLCULO CFD DE VELAS

En este capítulo, se presenta el modelo global desarrollado durante el proyecto, a fin de simular perfiles realistas de velas bajo condiciones determinadas de cálculo. El modelo estudiado consta de dos ejes principales:

- Generación de la geometría de las velas en dos dimensiones.
- Simulación CFD de las velas.

El propósito principal del proyecto consiste en la generación de una cadena completa de cálculo realimentada, pues los resultados de las simulaciones son a su vez requeridos en la generación de la geometría de los perfiles de las velas, resultando en sí mismo un proceso iterativo. Es por lo tanto fundamental el diseño de un modelo de gran reproductibilidad, capaz de resolver la problemática intrínseca de la forma más autónoma y automática posible. Por otra parte, la resolución debe aportar la mayor precisión posible. Considerando ambas premisas, se pretende encontrar un modelo resultado del mejor compromiso posible entre la precisión de los cálculos, y la robustez y estandarización en sus operaciones.

3.1 Modelo de generación de la geometría de la vela

Se comienza detallando el modelo mediante el cual se generan los contornos de las velas que posteriormente serán importadas a ANSYS Fluent.

3.1.1 Fundamentación teórica

A continuación, se procederá a presentar el desarrollo teórico seguido para definir la geometría de la vela en función de los reglajes especificados. En primer lugar, se muestra el modelo de deformación de una vela genérica. El objetivo entonces será encontrar las expresiones que permitan definir las posiciones intermedias de la vela, es decir su curvatura.

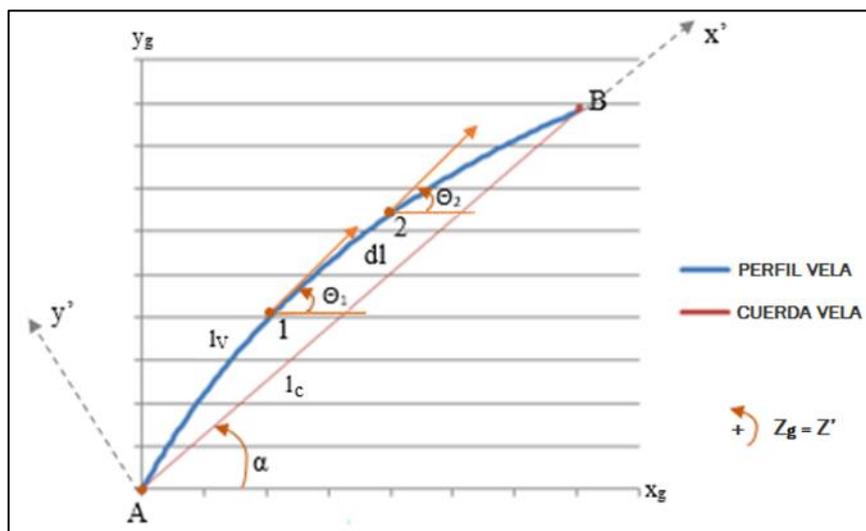


Ilustración 8 Generación del perfil de la vela [1]

3.1.2 Resolución de la ecuación diferencial

La ecuación diferencial obtenida en el apartado anterior ha sido resuelta numéricamente, es decir, discretizando para una serie de puntos utilizando un incremento de la longitud de la vela (Δl_v) suficientemente pequeño para reducir las posibles desviaciones y errores inherentes a la resolución numérica.

En primer lugar, se selecciona el número de puntos (N_{pts}), para así obtener el ΔL_v que se utilizará en la resolución.

$$\Delta L_v(m) = \frac{L_v}{N_{pts} - 1} \quad (3.1)$$

Posteriormente, se determina el valor de la longitud de vela (l_v), ángulo (θ), y posiciones X e Y para cada punto. Para ello se necesitan valores iniciales del ángulo en el extremo inicial (θ_1), como sus coordenadas (las coordenadas del extremo inicial de la vela es un dato extraído de la geometría y configuración del velero considerado), además de la tensión a la que está sometida la vela. Estos valores iniciales o de inicialización para la resolución de la ecuación diferencial de la geometría de la vela serán ajustados posteriormente de acuerdo con satisfacer las pertinentes condiciones de contorno, como se expondrá más adelante en el presente documento.

La resolución numérica por tramos sigue las siguientes expresiones que se muestran a continuación:

- Longitud (L_v): expresada en metros, indica la longitud del perfil de la vela desde el extremo inicial hasta el punto considerado.

$$L_{v_i}(m) = L_{v_{i-1}} + \Delta L_v \quad (3.2)$$

- Presión (P): expresada en Pascales, se corresponde a la diferencia de presión a ambos lados del perfil para cada segmento diferencial de este. Inicialmente, para un primer modelo, se fija un perfil de presión constante a lo largo de toda la longitud de la vela, de un valor de $100 Pa^1$.
- Tensión (T): expresada en Newtons, constante a lo largo de toda la vela. El correcto ajuste de la tensión para cada configuración de parámetros de trimado y perfiles de presión, es de gran importancia para obtener perfiles de vela realistas.
- Ángulo (θ): expresado en radianes, ángulo de la tangente al perfil en cada punto según la dirección horizontal.

$$\theta_i(rad) = \theta_{i-1} - \frac{P_i(l_v)}{T} \cdot \Delta L_v \quad (3.3)$$

¹ El perfil de presiones inicial ha sido seleccionado en base a los resultados de trabajos anteriores [1]. Tras realizar cálculos CFD en el cuadro del proyecto, se ha confirmado que el orden de magnitud de la presión se ajustaba a esta hipótesis.

- Posición X, expresada en metros: es la posición sobre el eje “X” del perfil de la vela en cada punto.

$$X_i = X_{i-1} + \Delta L_v \cdot \cos\left(\frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2}\right) \quad (3.4)$$

- Posición Y, expresada en metros: es la posición sobre el eje “Y” del perfil de la vela en cada punto.

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta L_v \cdot \sen\left(\frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2}\right) \quad (3.5)$$

Perfil de la vela					
Punto	L (m)	Presión (Pa)	ϑ (rad)	X (m)	Y (m)
0	0.000	100	0.765	0.000	0.000
1	0.026	100	0.760	0.018	0.018
2	0.051	100	0.756	0.037	0.035
3	0.077	100	0.751	0.056	0.053
4	0.102	100	0.746	0.074	0.070
5	0.128	100	0.741	0.093	0.087

Ilustración 9 Resolución numérica perfil de una vela

En la Ilustración 9 se adjunta el cálculo de los cinco primeros puntos del perfil de una vela generados a partir de una macro implantada en Excel.

3.1.3 Condiciones de contorno de las velas

Con el objetivo de poder ajustar tanto la tensión del perfil de la vela como el ángulo inicial θ_1 , se deben de definir las condiciones de contorno del problema a resolver. Para ello se considera el reglaje particular para la configuración de cada vela por separado, es decir, para la vela mayor y el foque.

3.1.3.1 Condiciones de contorno de la vela mayor

El origen (0,0) de nuestro modelo se corresponde con el mástil, punto inicial del perfil de la vela mayor. El extremo final del perfil también es conocido al ser fijado sobre la botavara según la configuración deseada.

El reglaje de la vela mayor repercute en dos parámetros de trimado.

- Ángulo de la botavara (α): determina el ángulo de apertura de la vela mayor respecto al eje longitudinal del barco, en este caso, el eje horizontal “X”.
- Longitud de la botavara ($L_{botavara}$): El grado de tensión de la vela mayor viene dado por la longitud de la cuerda del perfil, es decir, la posición del extremo final de la vela

sobre la botavara del velero. El extremo final del perfil de la vela mayor generado deberá coincidir con la posición sobre la botavara que se ha definido.

Se tienen dos condiciones de contorno:

$$X_{final} = L_{botavara} \cdot \cos(\alpha) \quad (3.6)$$

$$Y_{final} = L_{botavara} \cdot \sen(\alpha) \quad (3.7)$$

En resumen, para la vela mayor, se conoce la posición de los dos extremos del perfil. El modelo ha de ser capaz de generar perfiles que cumplan estas condiciones de contorno ajustando para ello las incógnitas de inicialización (tensión y ángulo inicial).

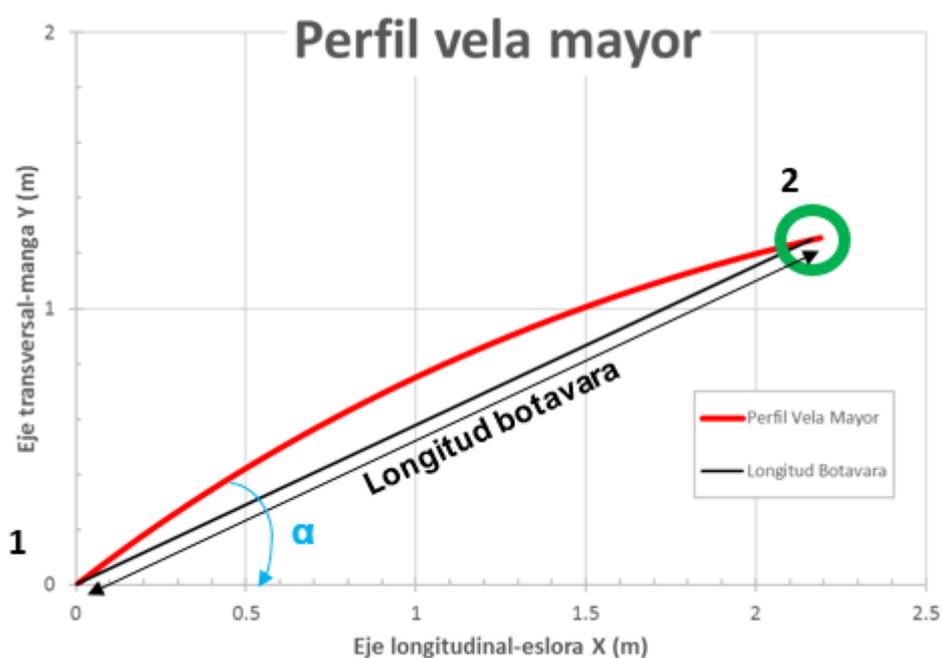


Ilustración 10 Perfil de la vela mayor para una configuración determinada

En la Ilustración 10 se muestra el perfil de la vela mayor y la longitud de la botavara especificada. Los dos extremos finales coinciden, satisfaciendo de esta forma las condiciones de contorno mencionadas previamente.

3.1.3.2 Condiciones de contorno del foque

El extremo inicial (1) del foque se encuentra sobre el eje longitudinal de la embarcación, a una distancia fija del mástil. En el modelo estudiado, el comienzo del foque se ha fijado a 2.65 m según la dirección negativa del eje horizontal "X". Por otra parte, el extremo final (2), está amarrado por una cuerda o escota. El origen de la escota es a su vez un dato de la geometría de la embarcación y se mantendrá fijo, coincidiendo con la posición de la polea (X_{polea}, Y_{polea}) .

El reglaje del foque consiste en la definición de la *longitud de la escota* (L_{escota}). La longitud de la escota debe ser suficientemente grande como para poder unir el extremo del foque con la polea en el caso más desfavorable, i.e. cuando el perfil del foque tenga una curvatura nula a lo largo de toda la vela. La longitud de la escota es la primera condición de contorno.

En el extremo (2) del foque existe continuidad de curvatura con la escota. Por lo que la unión de la escota y el perfil del foque es en tangencia. La curvatura en el extremo final del perfil es la segunda condición de contorno a respetar.

Las condiciones de contorno resultantes son:

$$L_{escota} = \sqrt{(X_{final} - X_{polea})^2 + (Y_{final} - Y_{polea})^2} \quad (3.8)$$

$$\theta_{final} = \arctan\left(\frac{Y_{polea} - Y_{final}}{X_{polea} - X_{final}}\right) \quad (3.9)$$

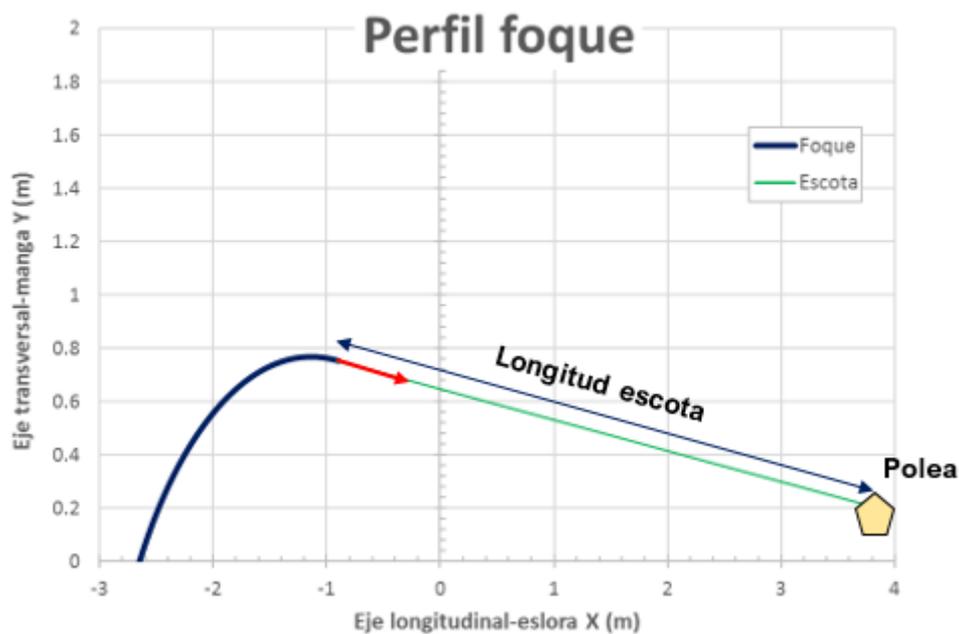


Ilustración 11 Perfil del foque para una configuración determinada

En la Ilustración 11 se muestra un perfil de foque generado (en azul) y la escota correspondiente (en verde).

3.1.4 Macro y código C++

El principal objetivo de esta etapa es adaptar la tensión de la vela y el ángulo inicial (θ_0) del perfil de la vela, dada una serie de parámetros de trimado y las distribuciones de presiones a lo largo de las velas.

Los parámetros de trimado introducidos previamente que definirán la configuración de las velas a calcular son los siguientes:

- Longitud de la escota del foque (L_{escota}) expresado en metros.
- Ángulo de la botavara de la mayor (α) expresado en radianes.
- Longitud de la botavara ($L_{botavara}$), que definirá la longitud de la cuerda del perfil de la vela mayor.

Con el fin de ajustar la tensión y el ángulo inicial, dos métodos han sido estudiado. El primero de ellos consiste en un modelo en Excel donde ambas magnitudes se adaptan de manera simultánea en cada iteración. La segunda solución propuesta es la resolución del problema mediante un código en C++, en el cual se ha implementado un bucle para adaptar el valor de la tensión y una vez fijada esta, un segundo bucle para adaptar el ángulo inicial, repitiéndose este procedimiento hasta satisfacer las necesidades.

El cálculo inicial de la geometría del perfil de vela se realiza con unos valores de inicialización razonables tanto de la tensión como del ángulo en el extremo inicial, para facilitar la convergencia de los resultados y asegurar la reducción de los errores respecto a las restricciones a cumplir en cada caso.

- ✓ Tensión inicialización (T_{inic}): 100 N.
- ✓ Ángulo inicialización ($\theta_{0, inic}$): 10 deg.

En los siguientes apartados se detalla cada uno de los métodos utilizados para satisfacer las condiciones de contorno de cada vela.

3.1.4.1 Modelo en Excel

En una de las primeras fases del estudio de la generación del perfil de la vela, se decidió implementar un modelo en Excel para resolver la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** numéricamente. Se discretizó la longitud de la vela en 100 tramos, generándose de esta forma 101 puntos del perfil de la vela.

Con el fin de poder ajustar la tensión y el ángulo inicial ($\theta_{0, inic}$), es necesario definir los errores que se utilizarán para corregir ambos valores en las sucesivas iteraciones.

3.1.4.1.1 Modelo en Excel del foque

El perfil de la vela del foque es generado en Excel a partir de los parámetros de trimado introducidos por el usuario. En la Ilustración 12 se muestra la tabla con los reglajes, que servirán como punto de partida del modelo.

REGLAJES FOQUE	
Tensión (N)	100
Θ_0 (deg)	10
Posición "x" de la polea X_{polea} (m)	3.85
Posición "y" de la polea Y_{polea} (m)	0.2
Longitud escota (m)	4.8
Longitud de la vela L_v (m)	2

Ilustración 12 Reglajes para el foque

En el perfil de vela del foque, se definen dos errores, cada uno de ellos referido a una de las condiciones de contorno del perfil presentadas en el apartado 3.1.3.2.

El primero relativo a la longitud de la escota entendida como la distancia entre la posición de la polea y el último punto del perfil, contraponiéndose a la longitud de la escota fijada por el usuario en los parámetros de configuración de la vela.

$$Error L_{escota} (m) = \sqrt{(X_{final,f} - X_{polea})^2 + (Y_{final,f} - Y_{polea})^2} - L_{escota} \quad (3.10)$$

Según ha sido definido en la expresión (3.10) el error en la longitud de la escota, si este es positivo indica que la escota generada en el modelo es superior a la definida en los parámetros de trimado.

El segundo error se refiere a el grado de tangencia en el punto de salida del foque entre el perfil generado y la recta definida por la escota. Se denomina este error como *error ángulo salida*, expresado en grados.

En la

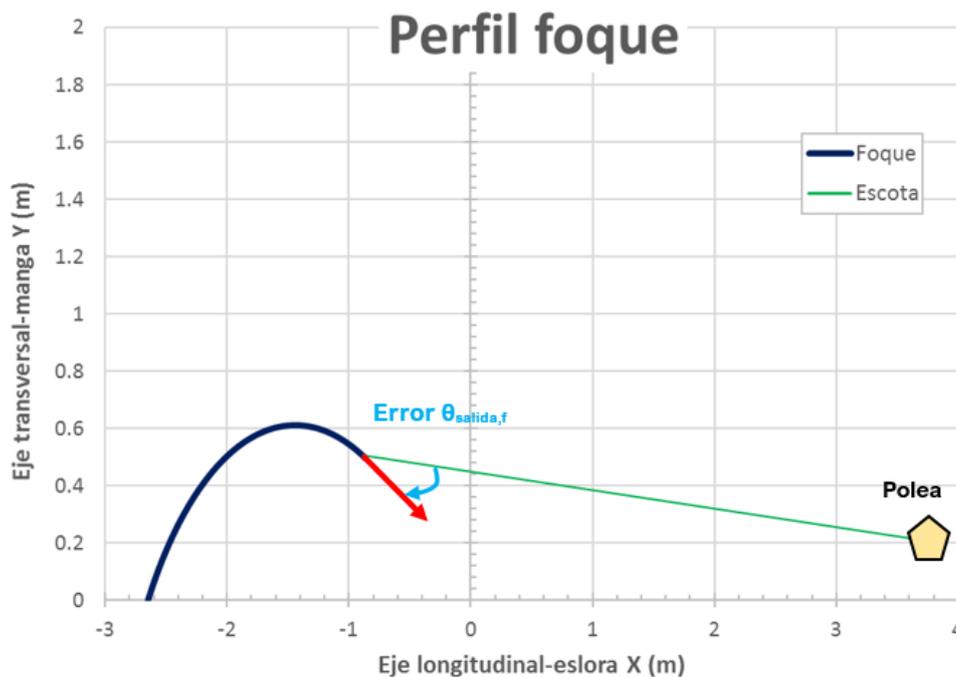


Ilustración 13 Perfil del foque generado con modelo Excel, con identificación del error en el ángulo de salida

Ilustración 13 se muestra de manera gráfica el error en $\theta_{salida,f}$ para una pareja determinada de tensión y ángulo inicial.

Se notifica que tanto la tensión como el ángulo inicial θ_0 , tienen influencia en los dos errores. A pesar de ello, se decide corregir la tensión con el error del ángulo de salida, mientras que el ángulo inicial $\theta_{0,f}$ se corrige con el error en la longitud de la escota. De forma que los nuevos valores al comienzo de cada iteración son calculados según las siguientes expresiones.

$$Tensión_{i,f}(N) = Tensión_{i-1,f} + Error \theta_{salida,f} \quad (3.11)$$

$$\theta_{0,i,f}(\text{deg}) = \theta_{0,i-1,f} - Error L_{escota} \quad (3.12)$$

Donde “i” es el número de iteración. Con el objetivo de automatizar este proceso iterativo, se ha desarrollado una Macro en Visual Basic² en Excel (ver Ilustración 14).

```
Sub MacroVela1()
'
' MacroVela1 Macro
'
'
error1 = Range("B31").Value
i = 1

Do While error1 > 0.0000001

    Range("E2:E3").Select
    Selection.Copy
    Range("B2").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    Application.ScreenUpdating = False
    i = i + 1
    error1 = Range("B31").Value
    If i = 5000 Then Exit Do

Loop

End Sub
```

Ilustración 14 Macro en Visual Basic para el perfil del foque

Esta macro permite iterar los errores de forma automática corrigiendo la tensión y el ángulo inicial gracias a un bucle del tipo “do_while”, hasta alcanzar un error global (sumatorio del valor absoluto de los dos errores) inferior a 10^{-7} , o en su defecto hasta llegar a un número máximo de iteraciones, en nuestro caso 5000.

$$Error_{foque Global} = |Error L_{escota}| + |Error \theta_{salida}| \quad (3.13)$$

3.1.4.1.2 Modelo en Excel de la vela mayor

El perfil de la vela de la mayor es generado en Excel a partir de los parámetros de trimado introducidos por el usuario. En la Ilustración 15 se muestra la tabla con los reglajes, que servirán como punto de partida del modelo.

² Visual Basic (VB) es un lenguaje de programación dirigido por eventos, desarrollado por Alan Cooper para Microsoft. Este lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes agregados.

REGLAJES VELA MAYOR	
Tensión (N)	100
Θ_0 (deg)	10
Longitud de la botavara $L_{botavara}$ (m)	2.5
Longitud de la vela L_v (m)	2.55
Angulo giro Botavara α (deg)	30

Ilustración 15 Reglajes de la vela mayor

La única restricción para fijar estos reglajes es que la longitud de la vela debe ser mayor que la longitud de la botavara, para posibilitar la aparición de perfiles con curvatura. En caso de ser la longitud de la vela igual a la longitud de la botavara, el perfil se generará como una recta completamente extendida sobre la botavara.

Al igual que en el modelo del foque, el cálculo inicial del perfil se realiza con unos valores de inicialización razonables tanto de la tensión como del ángulo en el extremo inicial, para facilitar la convergencia de los resultados y asegurar la reducción de los errores respecto a las restricciones a cumplir en cada caso.

- ✓ Tensión inicialización (T_{inic}): 100 N.
- ✓ Ángulo inicialización ($\theta_{0, inic}$): 10 deg.

El perfil de la vela mayor generado tiene asignado dos errores que se corresponden a las dos condiciones de contorno mencionadas en el apartado 3.1.3.1. Los errores indican la desviación del punto final del perfil respecto al extremo final de la botavara.

$$Error X (m) = X_{final} - L_{botavara} \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (3.14)$$

$$Error Y (m) = Y_{final} - L_{botavara} \cdot \sen\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (3.15)$$

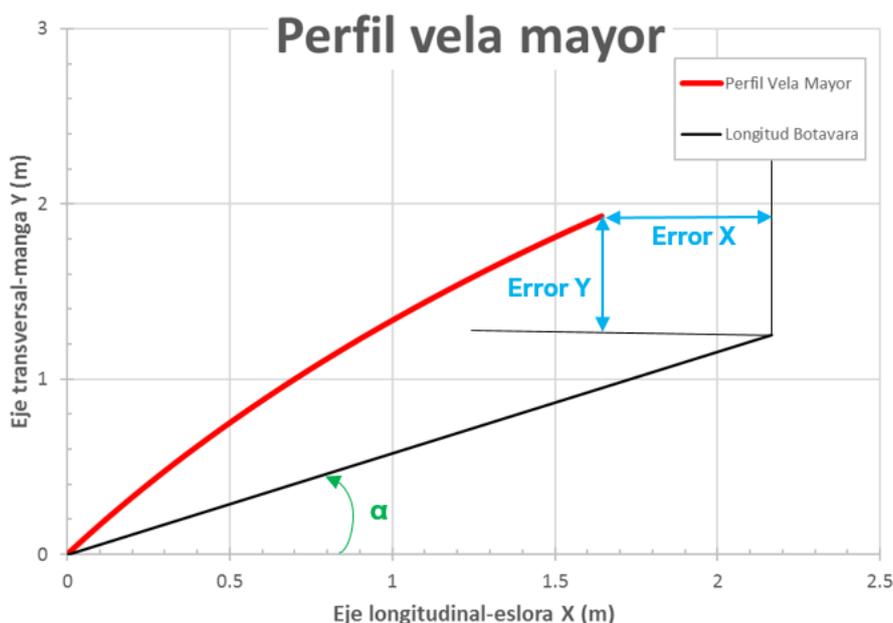


Ilustración 16 Perfil de la vela mayor generado en Excel, con identificación del error en X y error en Y

El error en X y el error en Y de un perfil generado se pueden observar en la Ilustración 16. En conclusión, el objetivo es que el modelo en Excel sea capaz de hacer coincidir ambos extremos. Para conseguirlo, se adapta el valor de la tensión y del ángulo inicial θ_0 mediante un proceso de iteración con ambos errores, de forma equivalente a lo realizado para el modelo del foque. Los nuevos valores propuestos para cada iteración responden a las siguientes expresiones:

$$Tensión_i (N) = Tensión_{i-1} - 100 \cdot Error X \quad (3.16)$$

$$\theta_{0_i} (deg) = \theta_{0_{i-1}} - 10 \cdot Error Y \quad (3.17)$$

Se implanta una Macro en Excel equivalente a la utilizada para el foque (ver Ilustración 17).

```
Sub MacroVela2()
'
' MacroVela2 Macro
'
'
error2 = Range("B35").Value
j = 1

Do While error2 > 0.0000001

    Range("E13:E14").Select
    Selection.Copy
    Range("B13").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    Application.ScreenUpdating = False
    j = j + 1
    error2 = Range("B35").Value
    If j = 5000 Then Exit Do

Loop

End Sub
```

Ilustración 17 Macro en Visual Basic para el perfil de la mayor

La macro actualiza los valores de tensión y de ángulo inicial (θ_0), hasta que el error global alcance un valor inferior a 10^{-7} , o en su defecto se supere un número determinado de iteraciones máximas, en este caso 5000 iteraciones. El error global del perfil de la mayor viene dado por la siguiente expresión:

$$Error_{mayor Global} = |Error X| + |Error Y| \quad (1.18)$$

3.1.4.1.3 Conclusiones del modelo en Excel

Después utilizar este testar este método de generación del perfil del foque mediante una macro en Excel para distintas distribuciones de presión estática, se remarca la fiabilidad y

robustez de este método. La convergencia para los valores de la tensión y el ángulo del extremo inicial es óptima y no ha requerido de más de 5000 iteraciones en ningún caso.

La principal desventaja encontrada con este método es la dificultad en crear ficheros de texto de salida con la geometría del perfil generado. Estos ficheros son a su vez, los inputs que se requerirán para generar la geometría en Ansys Fluent.

La Ilustración 18 muestra la geometría de los perfiles de vela del foque y de la mayor generados mediante el modelo en Excel detallado, para una configuración determinada.

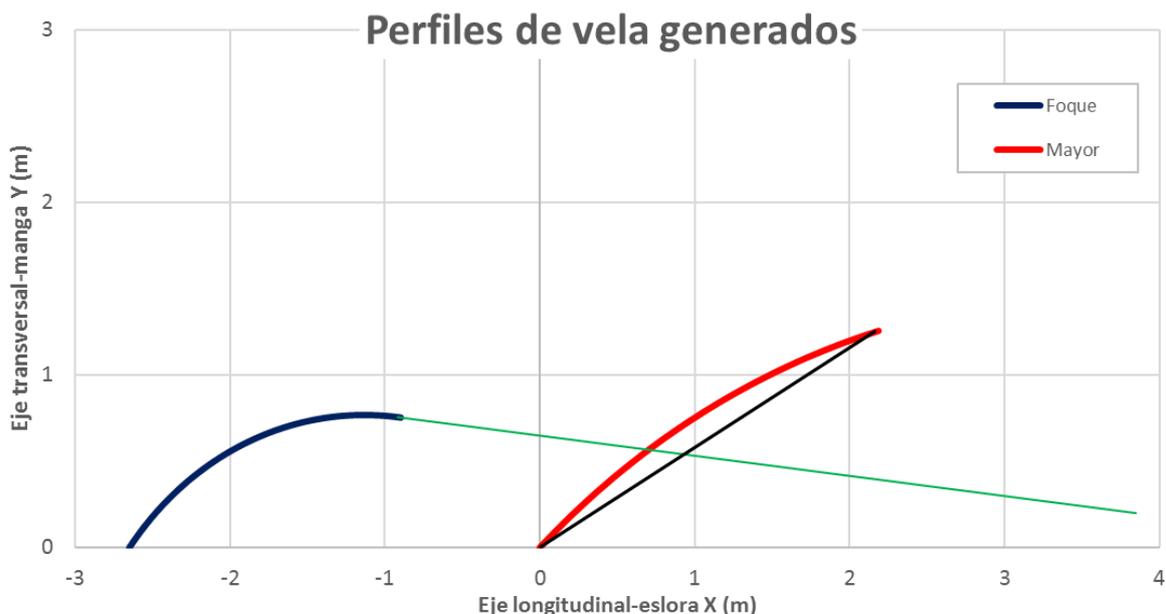


Ilustración 18 Perfiles de vela generados con el modelo en Excel. a) Perfil del foque b) Perfil de la vela mayor

3.1.4.2 Código C++

Teniendo en cuenta el objetivo inicial del proyecto de obtener una herramienta capaz de generar perfiles de vela iterados en función de la distribución de presiones resultado de los cálculos CFD en Ansys Fluent, se remarcan diversos aspectos:

- ✓ Para poder importar a Ansys los perfiles de vela generados, se requiere la creación un fichero de puntos con las coordenadas de los perfiles según un formato determinado.
- ✓ Los resultados de presión extraídos de la simulación CFD de las velas, son suministrados según una discretización correspondiente a la malla utilizada, sin ajustarse necesariamente a los tramos de longitud igual a Δl_v de la geometría. Esto implica la necesidad de interpolar las distribuciones de presión para cada tramo considerado en el modelo de generación de los perfiles.

Debido a esta problemática, se decide desarrollar un modelo de generación de perfiles equivalente al modelo inicial en Excel, realizando algunas modificaciones que serán detalladas en la continuación del presente documento.

El modelo de generación de la geometría mediante el código en C++, reporta ventajas interesantes respecto al Excel, principalmente en la creación de ficheros de coordenadas,

lectura de ficheros de resultados, además de flexibilidad adicional. El código C++, ha sido realizado gracias a la utilización del compilador “Dev-C++”.

Para la ejecución del código, se precisan diferentes ficheros de datos, algunos de ellos suministrados por el usuario, y otros son resultado de las simulaciones NS2D³ en ANSYS Fluent. En la Ilustración 19 se muestra de forma esquemática los archivos de entrada con los que el código se ejecuta, y los archivos resultado principales que servirán para generar la geometría de las velas en Fluent.

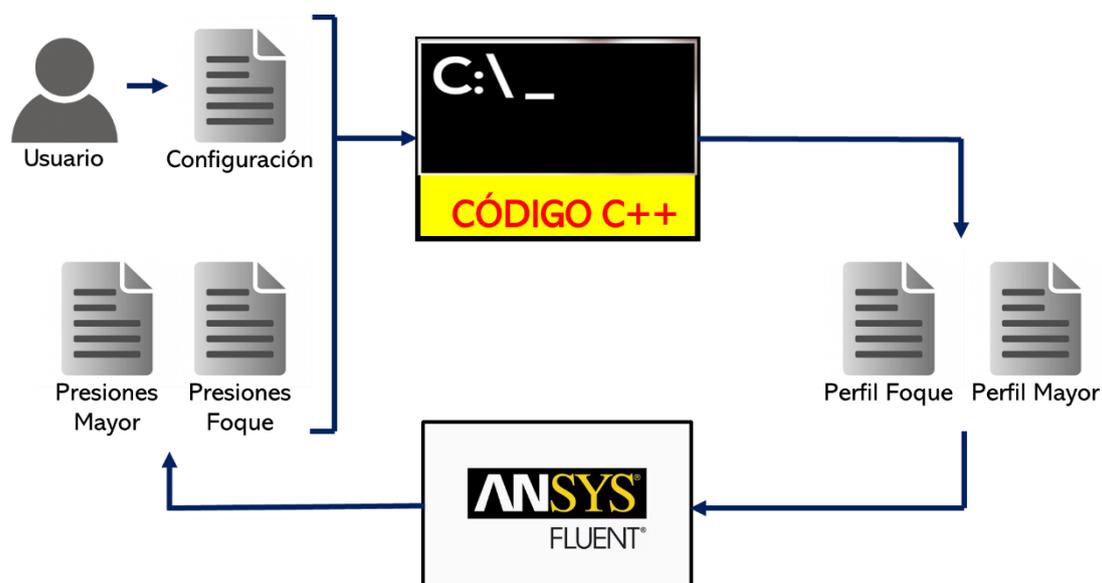


Ilustración 19 Esquema de entradas y salidas del código desarrollado

Los archivos en cuestión se enumeran a continuación:

- **Archivo de configuración** (*path cfg.txt*): fichero de texto generado por el usuario, que incluye los parámetros de trimado del caso de cálculo particular.
- **Archivos de presiones** (*path_extra/intra-F/M_prs.txt*): ficheros de texto generados por ANSYS Fluent con los diferentes datos de presión de los contornos de las velas simuladas.
- **Archivo de perfil intradós del foque** (*path intraF XY.txt*): fichero de texto generado por el código, donde se recogen las coordenadas en metros de los puntos del intradós del foque.
- **Archivo del perfil extradós del foque** (*path extraF XY.txt*): fichero de texto generado por el código, donde se recogen las coordenadas en metros de los puntos del extradós del foque
- **Archivo del perfil intradós de la mayor** (*path intraM XY.txt*): fichero de texto generado por el código, donde se recogen las coordenadas en metros de los puntos intradós de la vela mayor.
- **Archivo del perfil extradós de la mayor** (*path extraM XY.txt*): fichero de texto generado por el código, donde se recogen las coordenadas en metros de los puntos extradós de la vela mayor.

³ NS2D: Navier-Stokes en dos dimensiones

3.1.4.2.1 Definición de los parámetros de trimado

El modelo precisa de la definición de los parámetros de trimado o reglajes de navegación que identificarán el caso de estudio a realizar. Estos parámetros pueden ser globales, como la orientación de la embarcación respecto a la dirección del viento aparente, o relativos al reglaje de una vela, como por ejemplo la longitud de la escota o el ángulo de la botavara.

Todos estos datos necesarios para la definir el entorno del problema y así generar los perfiles de las velas, son suministrados mediante un fichero de texto (*path_cfg.txt*), que será leído al inicio de la ejecución del código. Este archivo de configuración junto con los archivos de presiones, son los inputs necesarios para el lanzamiento del programa.

PARÁMETROS DE DEFINICIÓN GEOMETRÍA PERFILES DE VELA

ÁNGULO DIRECCIÓN (DEG)	45
DISTANCIA FOQUE MAYOR (M)	2.65
ANCHO DE VELA (M)	0.005
N.º DE PUNTOS	200
COORDENADA "X" DE LA POLEA (M)	3.85
COORDENADA "Y" DE LA POLEA (M)	0.2
LONGITUD VELA MAYOR (M)	2.55
LONGITUD BOTAVARA (M)	2.5
ÁNGULO BOTAVARA (DEG)	60
LONGITUD FOQUE (M)	2
LONGITUD ESCOTA (M)	4.8

Ilustración 20 Especificaciones fijadas en el archivo de configuración "path_cfg.txt"

La tabla de la Ilustración 20 presenta todos los parámetros de trimado presentes en el archivo de configuración. El valor de cada uno de los reglajes debe ser introducido en las unidades especificadas. Es de vital importancia definir unos reglajes compatibles y que simulen una configuración real de las velas y de la embarcación.

3.1.4.2.2 Lectura presión estática de la vela

Como resultado de las simulaciones en CFD en ANSYS Fluent, se obtienen dos ficheros de presión estática por cada vela. Estos ficheros suponen la entrada de cada iteración junto con el fichero de configuración (invariable durante las iteraciones para una configuración de navegación).

- **Fichero de presión intradós** (*path intraF/M prs.txt*): Fichero de texto en el que se encuentran los datos de presión estática absoluta del intradós expresados en Pascales, según la abscisa curvilínea del perfil intradós del foque (*intraF*) o de la vela mayor (*intraM*) expresado en metros.
- **Fichero de presión extradós** (*path extraF/M prs.txt*): Fichero de texto en el que se encuentran los datos de presión estática absoluta del extradós expresados en Pascales, según la abscisa curvilínea del perfil intradós del foque (*extraF*) o de la vela mayor (*extraM*) expresado en metros.

```
(title "Static Pressure vs. Curve Length")
(labels "Curve Length" "Static Pressure")

((xy/key/label "mayor_intradós")
0 101328
0.050127 101254
0.100169 101269
0.150119 101276
0.200124 101280
0.250197 101285
0.300285 101290
0.350376 101292
0.400465 101293
0.450464 101293
0.500414 101294
0.550364 101294
0.600339 101294
0.650591 101294
0.70083 101294
0.750856 101293
0.800894 101293
0.850981 101293
0.901195 101293
0.951281 101293
1.00126 101293
1.05122 101293
1.10132 101293
1.15129 101293
1.20124 101293)
```

Ilustración 21 Formato del fichero de resultados de ANSYS Fluent de presión estática del intradós de la vela mayor

Los datos de presión estática son leídos y almacenados en un fichero temporal (Temporal.txt). Posteriormente los datos son leídos del e interpolados para los tramos en los que se ha discretizado la vela y almacenados en memoria. La presión ($P(l_v)_i$) de cada tramo, se corresponde a la diferencia entre la presión intradós y la presión extradós en Pascales.

$$P(l_v)_i (Pa) = P(l_v)_{i,intradós} - P(l_v)_{i,extradós} \quad (3.19)$$

Esta diferencia de presión es la que, a efectos prácticos, es utilizada en el modelo de generación del perfil de vela correspondiente.

3.1.4.2.3 Bucle de ajuste de las variables de inicialización de la generación de perfiles

Una de las principales modificaciones efectuadas en el código C++ respecto al modelo en Excel, consiste en la estrategia iterativa de reducción de los errores de cada perfil mediante la adaptación de la tensión interna y del ángulo inicial (θ_0).

➤ **Bucle del foque**

Para el foque, la definición de los errores es equivalente a aquella presentada en el modelo de Excel. Se considera un error en la longitud de la escota (ver expresión (3.10)), y un error del ángulo de salida ($\theta_{0,f}$) expresado en radianes en lugar de en grados.

$$Error \theta_{salida,f} (rad) = \arctan\left(\frac{Y_{polea} - Y_{final}}{X_{polea} - X_{final}}\right) - \theta_{final,f} \quad (3.20)$$

Este bucle cuenta con dos rutinas, o dos sub-bucles, uno de ellos anidado en el otro. El primer bucle, también llamado “bucle interno”, ajusta el ángulo inicial ($\theta_{0,f}$) mediante el error en el ángulo para un valor de tensión fijo. A continuación, se muestra la expresión para la corrección del ángulo:

$$(\theta_{0,f})_i \text{ (rad)} = (\theta_{0,f})_{i-1} + \text{Error } \theta_{\text{salida},f} \quad (3.21)$$

El proceso iterativo se repite hasta que el error en el ángulo de salida es menor de 10^{-3} radianes, o en su defecto hasta que se supera un número máximo de iteraciones fijado a 10.000.

El bucle interno de ajuste de $\theta_{0,f}$ está contenido en un segundo bucle o “bucle externo”. En este bucle se adapta la tensión utilizando el error en la longitud de la escota, y al modificar su valor se ejecuta de nuevo el bucle interno de ajuste del ángulo inicial.

$$\text{Tensión}_{f,i} \text{ (N)} = \text{Tensión}_{f,i-1} - 10 \cdot \text{Error } L_{\text{escota}} \quad (3.22)$$

Se ha amplificado el error en la longitud de la escota diez veces, ya que, al estar expresado en metros, mientras la tensión viene dada en Newtons, la corrección resultaba demasiado lenta. Después de realizar varias pruebas con distintos órdenes de magnitud para acelerar la convergencia del bucle externo, se ha remarcado que una amplificación excesiva del error puede llegar a no hacer converger el sistema, y por tanto no llegar a satisfacer las condiciones de contorno del sistema.

El proceso iterativo continúa hasta que el error en la longitud de la escota es inferior a 1 mm o en su defecto cuando el bucle externo se haya ejecutado un número máximo de iteraciones fijado también a 10000. En este caso no tiene sentido especificar un error global para el foque, ya que ambos errores se iteran de forma independiente como se ha especificado anteriormente.

➤ **Bucle de la mayor**

En el caso de la generación del perfil de la vela mayor, se opta por expresar la desviación de los perfiles generados respecto a las condiciones de contorno a satisfacer, mediante dos errores diferentes a los definidos en el modelo Excel en las expresiones (3. 14) y (3. 15).

$$\text{Error } \alpha \text{ (rad)} = \arctan\left(\frac{Y_{\text{final},m} - Y_{0,m}}{X_{\text{final},m} - X_{0,m}}\right) - \alpha \quad (3.23)$$

$$\text{Error } L_{\text{botavara}} = \sqrt{(X_{\text{final},m} - X_{0,m})^2 + (Y_{\text{final},m} - Y_{0,m})^2} - L_{\text{botavara}} \quad (3.24)$$

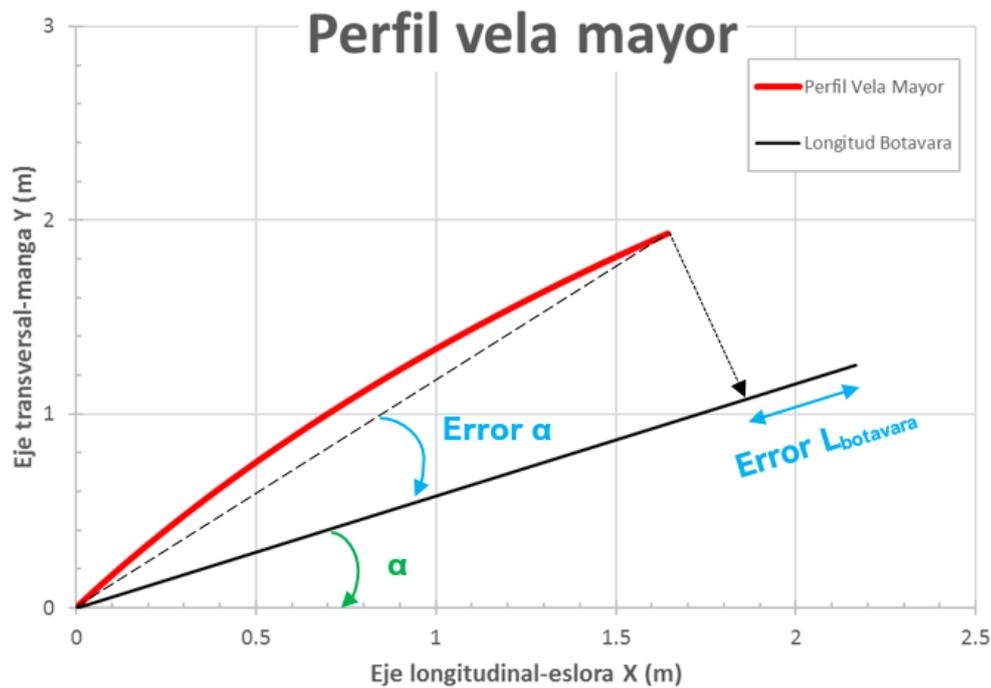


Ilustración 22 Identificación de los errores en α y de longitud de la botavara, utilizados en el modelo de generación del perfil de la mayor en el código C++

En la Ilustración 22, se señalan los errores correspondientes a la nueva definición. La razón principal por la que se han redefinido estos errores es la necesidad de dar un sentido físico a cada desviación, y así poder iterar el error intuitivamente.

El error en α es corregido mediante la modificación del ángulo inicial del perfil ($\theta_{0,m}$), mientras que el error en la longitud de la botavara (longitud de la cuerda del perfil de la vela), es iterado gracias a la variación de la tensión en el perfil. De acuerdo con estas observaciones, se confirma la conveniencia de este nuevo bucle de adaptación a las condiciones de contorno de la mayor, ya que cada error es minimizado modificando la magnitud de mayor influencia respectivamente.

$$Tensión_{m,i} (N) = Tensión_{m,i-1} - 10 \cdot Error L_{botavara} \quad (3.25)$$

$$\theta_{0,m_i} (rad) = \theta_{0,m_{i-1}} - Error \alpha \quad (3.26)$$

El término que multiplica al error en la longitud de la botavara de la expresión (3.25), es un acelerador de la corrección de la tensión, pues esta última es definida en Newtons mientras que el error de la longitud es expresado en metros, con valores muy inferiores a aquellos que impliquen un cambio significativo de la tensión en el perfil.

La tensión y el ángulo inicial ($\theta_{0,m}$) son adaptados simultáneamente en cada iteración dentro de un mismo bucle. Este proceso se ejecuta hasta que el error global (ecuación (3.27)) alcance un valor inferior a 10^{-3} , o en su defecto se supere el número máximo de iteraciones.

$$Error_{mayor\ Global} = |Error\ L_{botavara}| + |Error\ \alpha| \quad (3.27)$$

3.1.4.2.4 Generación de los contornos de las velas a partir de los perfiles

Para poder simular una geometría 2D determinada en ANSYS Fluent, se requiere de una superficie cerrada con la que se generará un hueco o vacío en el volumen fluido. La superficie de las velas viene definida por un contorno. En este apartado se detalla la obtención del contorno de cada vela a partir de los correspondientes perfiles de vela.

Los dos contornos que definen la geometría de la vela son denominados como “*contorno extradós*” y “*contorno intradós*”. El contorno extradós se refiere a la cara superior de la vela, mientras que el contorno intradós se refiere a su cara intradós. En condiciones de funcionamiento normales, la presión será mayor en el contorno intradós respecto al extradós.

El código C++ calcula en un primer momento los perfiles, i.e. velas de espesor nulo. La estrategia seguida es la generación de un segundo perfil para cada vela mediante la traslación del perfil generado una distancia igual al ancho de vela definido en el fichero de configuración (ver apartado 3.1.4.2.1). De esta forma, se reutiliza el perfil de la vela calculado como uno de los dos contornos que la definen geoméricamente. De forma particular, los perfiles pasan a ser el contorno extradós de cada vela.

- Perfil del foque → Contorno extradós del foque.

$$(X, Y)_{f,extradós} = (X, Y)_{f,perfil} \quad (3.28)$$

- Perfil de la mayor → Contorno extradós de la mayor.

$$(X, Y)_{m,extradós} = (X, Y)_{m,perfil} \quad (3.29)$$

Los contornos intradós de las velas son calculados siguiendo la siguiente expresión:

$$X_{intradós,i} (m) = X_{extradós,i} + a \cdot \text{sen}(\theta_i) \quad (3.30)$$

$$Y_{intradós,i} (m) = Y_{extradós,i} - a \cdot \text{cos}(\theta_i) \quad (3.31)$$

Donde “ a ” es el ancho de la vela expresado en metros, definido por el usuario en el fichero de configuración.

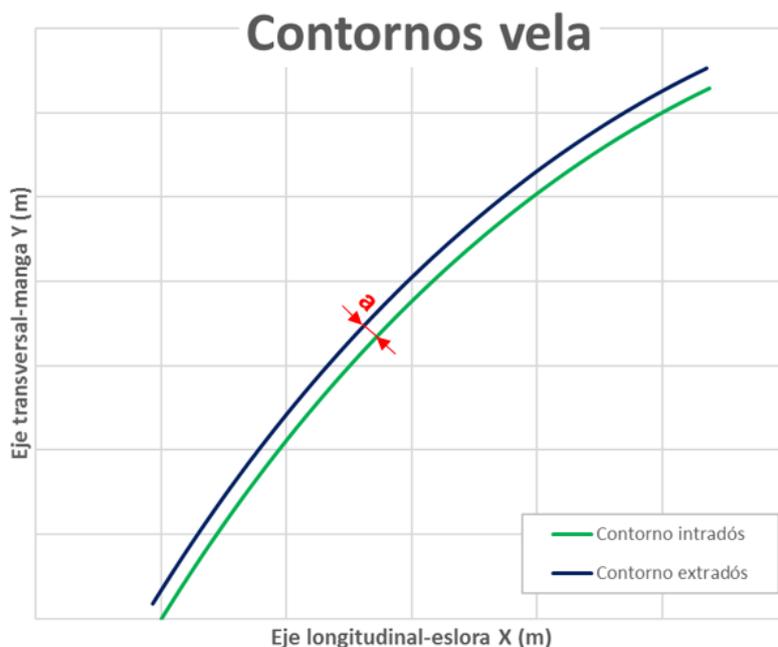


Ilustración 23 Contornos extradós e intradós de una vela de espesor "a"

La Ilustración 23 muestra los dos contornos de la vela, resultado del perfil generado. El ancho de vela utilizado en el presente estudio es de 5 mm. Se trata de un espesor ligeramente sobredimensionado, la explicación reside en facilitar el proceso de mallado de la geometría de las velas en Fluent como se expone más adelante en el proyecto.

3.1.4.2.5 Giro de los perfiles según el ángulo de dirección

La siguiente etapa consiste en realizar un giro con centro en el origen de coordenadas (0,0), un ángulo igual al ángulo de dirección definido en el fichero de configuración (ver apartado 3.1.4.2.1). De esta forma es la geometría la que se adaptará a cada caso de cálculo, y no las condiciones de contorno del problema en Fluent, pues el viento aparente siempre seguirá la dirección positiva del eje horizontal "X" (ver Ilustración 24).

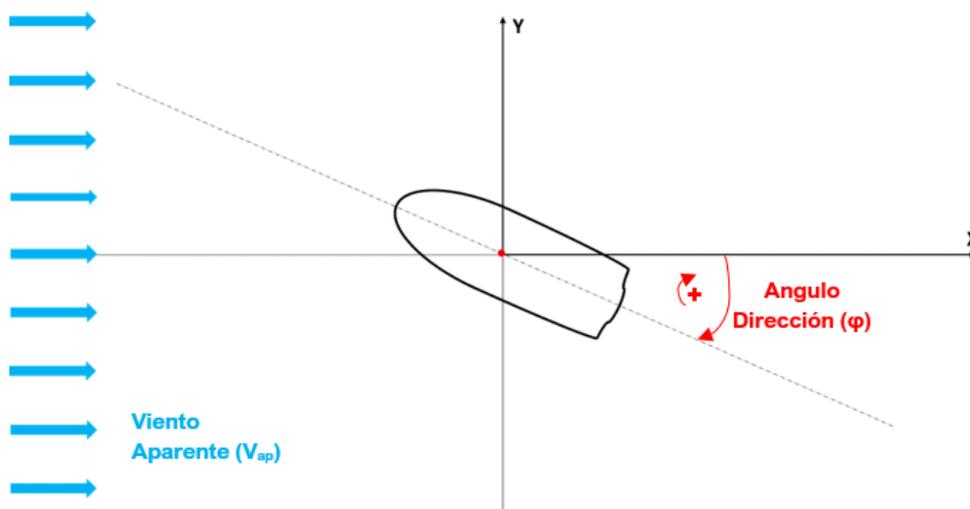


Ilustración 24 Esquema de la orientación del velero en las simulaciones CFD

El giro de los puntos del perfil de las velas, es equivalente a cambiar de sistema de referencia, por uno denominado (X', Y') , con origen común al absoluto y un giro igual al ángulo de dirección, pero de signo contrario. Utilizando la matriz de giro de sistema de referencia, se obtienen las siguientes de las nuevas coordenadas para cada punto

$$X' (m) = X \cdot \cos\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) + Y \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (3. 32)$$

$$Y' (m) = Y \cdot \cos\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) - X \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (3. 33)$$

Donde los términos son:

- X : Coordenada horizontal previa al giro expresada en metros.
- Y : Coordenada vertical previa al giro expresada en metros.
- X' : Coordenada horizontal del punto correspondiente expresada en metros tras realizar el giro.
- Y' : Coordenada vertical del punto correspondiente expresada en metros tras realizar el giro.
- φ : Ángulo de dirección expresado en grados relativo al eje longitudinal de la embarcación con respecto a la dirección del viento aparente.

3.1.4.2.6 Compatibilidad del código con ANSYS Fluent

El código C++ genera como se ha detallado anteriormente, los dos contornos del foque y de la mayor. Estos contornos son la base de la generación de la geometría que se simulará en ANSYS Fluent. Resulta fundamental, por tanto, la correcta transferencia de las coordenadas que definen los cuatro contornos entre el código y el módulo de geometría correspondiente en ANSYS.

ANSYS ofrece al usuario dos alternativas en cuanto a módulos propios de definición de la geometría. Estos son:

- *Space Claim*.
- *Design Modeler*.

En función de cuál de los dos se utilice, los ficheros con los datos a importar deben de seguir un formato u otro. Durante la realización del proyecto se han probado ambas opciones, eligiendo finalmente la opción "*Design Modeler*" por diversos motivos:

- Módulo más potente de geometría.
- Los datos importados pueden volver a releerse mediante la opción "refresh".
- Existencia de amplia documentación referente a sus funcionalidades.
- Mayor implementación en ANSYS que el módulo "*Space Claim*".

De acuerdo con las exigencias de "*Design Modeler*", se debe de suministrar un fichero de texto separado por tabulaciones con las coordenadas para importar una curva 3D. El fichero tendrá el formato que se muestra en la Ilustración 25.

ID	N _{pto}	X	Y	Z
1	1	-1,87383	1,87383	0
1	2	-1,87508	1,86386	0
1	3	-1,87626	1,85388	0
1	4	-1,8774	1,84389	0
1	5	-1,87847	1,8339	0
1	6	-1,8795	1,8239	0
1	7	-1,88046	1,8139	0
1	8	-1,88137	1,80389	0
1	9	-1,88223	1,79388	0
1	10	-1,88303	1,78386	0

Ilustración 25 Formato fichero de coordenadas generado por el código, compatible con Design Modeler

Cada dato se recoge en una fila, con cuatro cifras separadas por tabulaciones con el siguiente significado:

- ID: Identificador de nuevo dato.
- N_{pto}: Número de dato dentro del fichero, comenzando a partir de la unidad.
- X: Coordenada “x” expresada en metros, en formato de coma decimal.
- Y: Coordenada “y” expresada en metros, en formato de coma decimal.
- Z: Coordenada “z” expresada en metros, en formato de coma decimal.

3.1.4.2.7 Conclusiones del modelo en C++

El modelo desarrollado e implementado en el código destaca por su robustez. Se destaca la inexistencia de problemas de convergencia en los perfiles, con los nuevos bucles de adaptación de las condiciones de contorno.

El aspecto más interesante del modelo es quizás la integración con ANSYS Fluent, ya que utiliza como entradas los ficheros resultado de las simulaciones, y proporciona como salidas ficheros de contornos compatibles con la geometría en Fluent.

Su principal ventaja respecto al primer modelo en Excel es la integración dentro de la cadena global de cálculo y la gestión de archivos, razón por la que ha sido la herramienta finalmente utilizada para lanzar los bucles de simulaciones CFD.

3.2 Simulación 2D en ANSYS Fluent

La siguiente etapa del bucle de cálculo CFD se desarrolla dentro del entorno de ANSYS Fluent. En este apartado se expone de forma detallada cada una de las fases seguidas:

1. Importación de los contornos de las velas generados.
2. Generación de la geometría del volumen fluido (VF).
3. Mallado de geometría a simular.
4. Configuración de la simulación, modelos utilizados y procedimientos de cálculo.
5. Extracción de resultados.

El punto de partida de un proyecto en ANSYS es el *Workbench* (ver Ilustración 26).

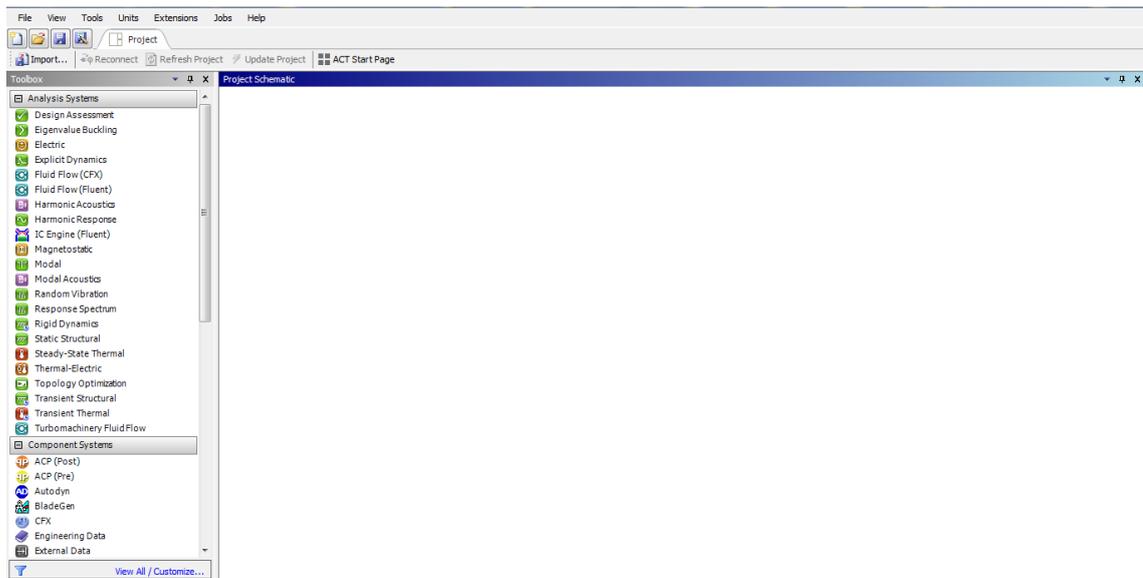
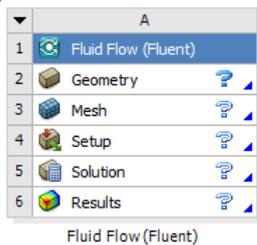


Ilustración 26 Workbench de ANSYS con Fluent

ANSYS proporciona diferentes sistemas de componentes individuales (geometría, malla, CFX, Fluent...), además de sistemas de análisis completos que recogen todos los componentes individuales necesarios bajo un mismo bloque unidad. Existen por tanto dos alternativas (ver Ilustración 27):

- Proyecto mediante componentes individuales: Consiste en utilizar los componentes individuales Geometría, Mallado, Fluent y CFD-Post relacionando cada uno de ellos en el orden mencionado.
- Proyecto mediante sistema de análisis: Con esta opción sólo se usa el bloque completo de “*Fluid Flow (Fluent)*”, que incluye todos los componentes individuales necesarios ya interconectados entre sí.

a)



b)

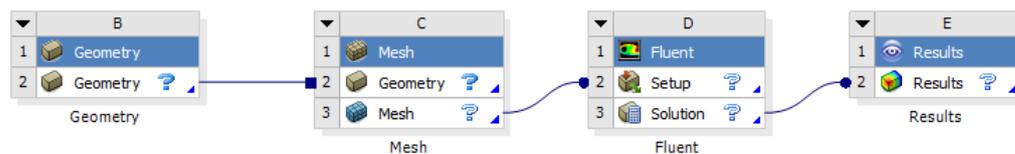


Ilustración 27 Alternativas en la arquitectura del proyecto. a) *Fluid Flow (Fluent)*, b) Conjunto de componentes individuales

Se ha optado por el paquete completo “*Fluid Flow (Fluent)*” al estar ya integrado. A continuación, se procederá a explicar las diferentes acciones en cada uno de los componentes del sistema de análisis.

3.2.1 Geometría en Design Modeler

La geometría es desarrollada mediante el módulo “*Design Modeler*”. El objetivo es generar el dominio del espacio por el cuál circulará el fluido (volumen fluido).

Los contornos de las velas generados por el código C++ son el punto de partida. Se crea una curva 3D para cada uno de los cuatro contornos, el modo de definición seleccionado es desde un archivo de coordenadas, indicando en cada caso el repertorio donde se encuentra almacenado el archivo correspondiente.

La sucesión de operaciones para importar cada contorno es la siguiente:

- *Concept* → *3D Curve* → *Definition* → *From Coordinates File* → *Definir directorio del archive de coordenadas* → *Generate*

En la ventana de detalles de la curva 3D, aparece un campo “*Coordinates unit*”, donde se fijarán las unidades en las que están expresadas las coordenadas del fichero importado, en el caso del modelo desarrollado son metros.

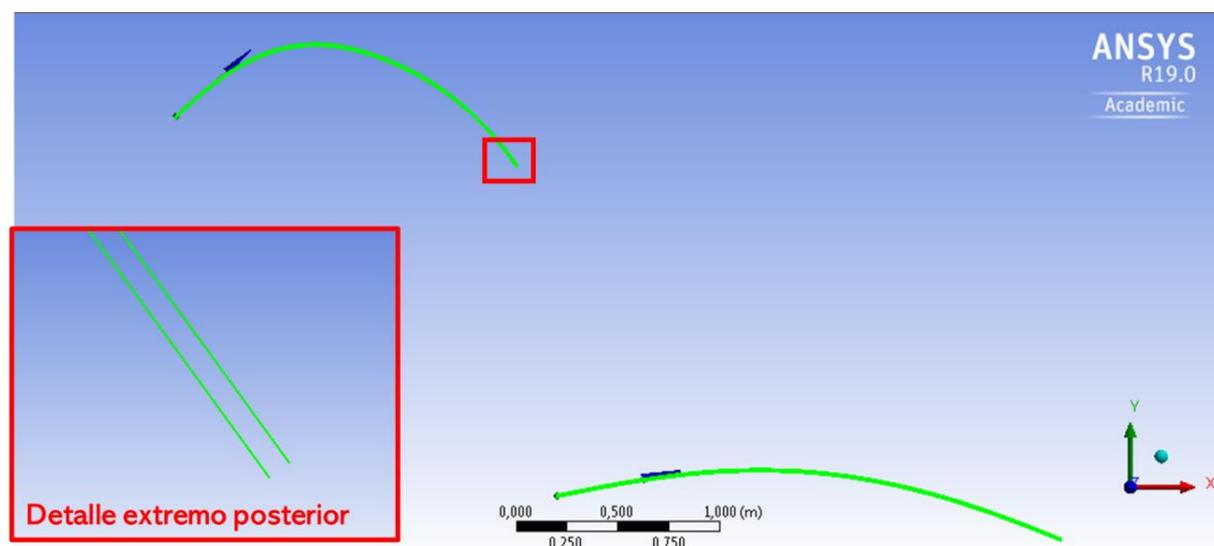


Ilustración 28 Contornos importados en Design Modeler

En la Ilustración 28 se muestran los cuatro contornos importados de las velas. Estos contornos no definen una superficie cerrada por sí mismos. Será entonces necesario “cerrar” estos contornos. Se ha optado por cerrar cada extremo de la vela mediante una recta. Se valida esta solución teniendo en cuenta que el espesor de la vela es muy reducido.

Las operaciones seguidas para generar cada recta son:

- *Concept* → *Lines From Points* → *Seleccionar los dos puntos de cada extremo* → *Generate*

Las cuatro rectas, son nombradas en función de la vela a la que pertenecen y su posición en ella.

- *BA_Foque*: Borde de ataque del foque, segmento del foque orientado aguas arriba.
- *BF_Foque*: Borde de fuga del foque, segmento del foque orientado aguas abajo.
- *BA_Mayor*: Borde de ataque de la mayor, segmento de la mayor orientado aguas arriba.
- *BF_Mayor*: Borde de fuga de la mayor, segmento de la mayor orientado aguas abajo.

Una vez se dispone de dos contornos cerrados correspondientes a cada una de las dos velas, se procede a crear las superficies que definen cada uno de ellos (*Superficie_foque* y *Superficie_mayor*). La razón por la que se necesitan estas superficies en vez de los propios contornos es que servirá de superficie negativa⁴ para definir la región por donde no podrá fluir el aire (fronteras internas del dominio fluido).

Las correspondientes operaciones para obtener cada superficie son:

- *Concept* → *Surface From Edges* → *Seleccionar los cuatro contornos de cada vela* → *Generate*

Posteriormente se pasa a la creación de las fronteras externas del volumen fluido. El dominio fluido implementado corresponde a un círculo con centro en (0,0,0), es decir en el origen del perfil de la mayor. El círculo tiene un radio de 35 m, suficientemente grande para poder simular con las menores perturbaciones posibles el flujo en torno a las velas situadas en su interior [1].

Para definir la superficie circular es necesario crear primero un *sketch* (*Circulo_exterior*) en el plano XY, i.e. el plano de trabajo. La frontera externa debe de estar dividida en dos semicircunferencias para definir posteriormente las condiciones de contorno de la simulación sobre ellas:

- **Inlet**: Sección de entrada del fluido.
- **Outlet**: Sección de salida del fluido.

Con este objetivo se dibujan dos semicircunferencias complementarias e independientes del mismo diámetro como se muestra en la Ilustración 29. Para verificar que se han generado dos semicircunferencias, se han de poder seleccionar cada una de ellas de forma independiente.

⁴ Superficie negativa: Superficie que se remueve de otra superficie o cuerpo en las herramientas CAD.

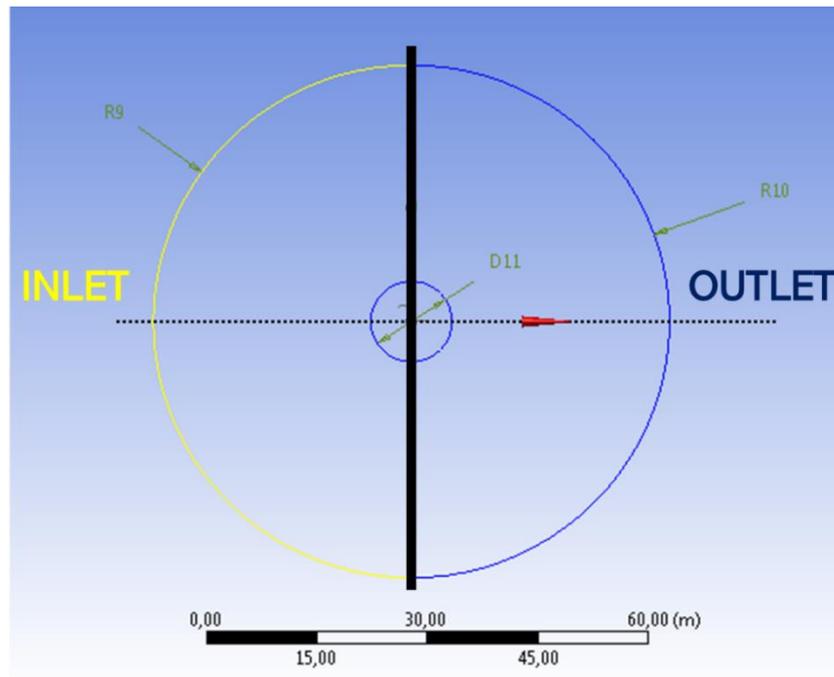


Ilustración 29 Sketch de las fronteras exteriores del volumen fluido

El siguiente paso consiste en crear el volumen fluido a partir del contorno circular exterior definido en el sketch. La sucesión de las operaciones correspondientes:

- *Concept* → *Surface from Sketch* → *Seleccionar sketch "Circulo_Exterior"* → *Generate*

El último paso en la elaboración de la geometría es sustraer del dominio circular, la superficie de las dos velas. Es necesario realizar una operación "*Boolean*":

- *Create* → *Boolean* → *Operation Subtract* → *Target Body: "Superficie_Circulo_Exterior"* → *Tool Body: "Superficie_Foque" y "Superficie_Mayor"* → *Generate*

En la Ilustración 30 se muestra el volumen fluido que se mallará posteriormente.

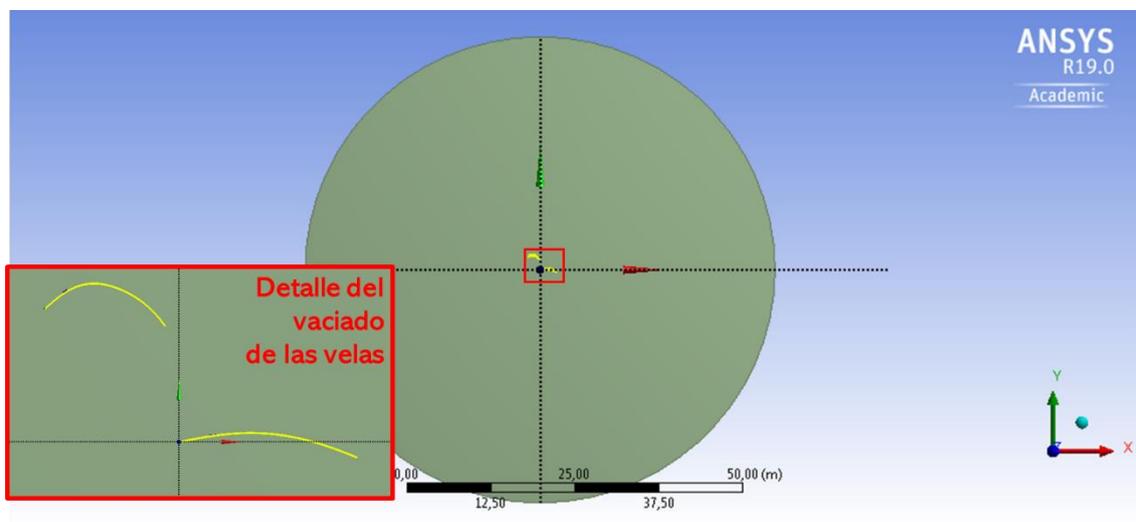


Ilustración 30 Geometría final del dominio fluido

Adicionalmente se generará una *superficie circular transparente* concéntrica a las fronteras externas y de 11 metros de diámetro. Esta superficie es una herramienta que se utilizará en la etapa de mallado a modo de superficie de refinamiento. Su generación será equivalente a la del círculo exterior, a excepción de que en el campo “*Operation*” de la ventana de detalles de la superficie, se activará la opción “*Add Frozen*” (ver ¡Error! No se encuentra el origen de

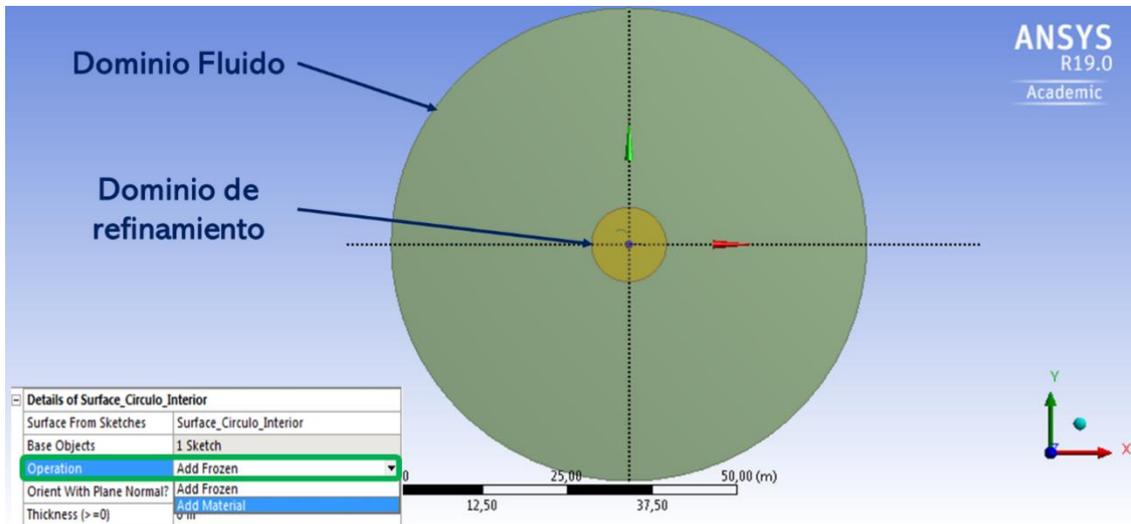


Ilustración 31 Dominio fluido y superficie de refinamiento interior

la referencia.).

Después de realizar todas estas operaciones, ANSYS obtiene como producto cuatro cuerpos o “*bodies*”. Sólo se precisan dos cuerpos, correspondientes al volumen fluido (*Volumen_Fluido*) que se simulará y el dominio de refinamiento en la proximidad de las velas (*Proximidad_Velas*). Las partes restantes son los contornos de las velas, estas han de ser suprimidas (*Supress Body*) a fin de evitar incompatibilidades en las siguientes etapas. Finalmente, el árbol de operaciones se debe ajustar a la Ilustración 32.



Ilustración 32 Resultado en el árbol de operaciones de Design Modeler

3.2.2 Generación de la malla

Tras la definición de la geometría, la siguiente etapa consiste en generar la malla mediante el módulo “*Meshing*” de ANSYS. La obtención de una malla de calidad es fundamental para obtener resultados realistas en las simulaciones CFD. Una malla no óptima suele ser el principal motivo por el cual un cálculo no converge. Por todo ello esta es una fase de vital importancia en el desarrollo del proyecto.

La realización de una malla de elevada calidad global no es un proceso inmediato, pues influyen numerosos factores, como la experiencia del usuario. Normalmente se toman como referencia de la calidad de la malla una serie de aspectos, que van a aportar valiosa información acerca de las modificaciones a implementar en el mallado:

- **Ortogonalidad**: Se refiere a el grado de ortogonalidad existente entre las diferentes mallas. Una ortogonalidad elevada facilita la transmisión de información desde una malla determinada hacia las colindantes.

El objetivo es controlar aquellas mallas con un nivel de ortogonalidad más bajo. A efectos prácticos, se considera que un nivel de ortogonalidad superior al 40 % es satisfactorio [2].

Al margen del grado de ortogonalidad del mallado, se debe de evaluar la localización de la malla o el conjunto de mallas de ortogonalidad degradada, y su potencial impacto en la simulación, pudiéndose aceptar ortogonalidades bajas en determinadas zonas del dominio fluido.

- **Ratio de expansión**: Se refiere a la diferencia de dimensiones entre una malla y las situadas a su alrededor. Cuanto más pequeño sea este, la evolución del tamaño de las mallas es más gradual y suavizada, reportando importantes ventajas en la simulación CFD.

De la misma forma que ocurre para la ortogonalidad, el objetivo es controlar las mallas más críticas en relación con la ratio de expansión. Un mallado es considerado satisfactorio cuando la expansión máxima es de 1.5, i.e. el mayor crecimiento de malla existente es de un 150 % [2].

El objetivo será conseguir un mallado de alta calidad respetando los criterios de ortogonalidad y de ratio de expansión, además de obtener una morfología harmoniosa en términos globales.

Resulta particularmente importante controlar las características de la malla en las proximidades del perfil aerodinámico a simular, en nuestro caso los contornos de las velas. Esta región es denominada como “malla de capa límite”, ya que es la encargada de simular todos los fenómenos inherentes al comportamiento del fluido en el seno de la capa límite y sus respectivas propiedades.

El otro aspecto fundamental estudiado durante el proyecto es la reproductibilidad del mallado, i.e. la capacidad de generar de manera automática una malla con los parámetros especificados para diferentes geometrías. El interés de desarrollar un modelo robusto y adaptativo reside en la necesidad de *actualizar* el mallado para cada iteración, donde la geometría de las velas variará.

El modelo de mallado deseado será aquel que suponga una solución de compromiso entre la calidad de la malla y la adaptabilidad frente a los cambios en la geometría de las velas. Se ha optado por mallar la geometría utilizando el menor número de operaciones posibles, las cuales son:

- Mapeado del volumen fluido con refinamiento interior.
- Mallado en la región próxima de los contornos.
- Discretización según la dirección de los perfiles.

A continuación, se detallan las operaciones empleadas en el modelo de mallado desarrollado.

3.2.2.1 Mapeado del dominio fluido con refinamiento interior (*Body Sizing*)

El primer paso consiste en mallar todo el dominio fluido de manera genérica. Adicionalmente, se ha definido un cuerpo de influencia (*body of influence*), que posibilita el refinamiento del dominio circular interno que contiene a las velas (ver apartado 3.2.1). La cadena de operaciones es la siguiente:

- *Mesh* → *Insert* → *Sizing* → *Geometry: Volumen_Fluido* → *Bodies of influence: Proximidad_Velas* → *Element Size: 0.1m* → *Size Function: Curvature* → *Generate*

En esta operación intervienen los dos cuerpos definidos. El tamaño del elemento ha sido fijado a 0.1 m , lo que significa un mallado relativamente fino en términos globales teniendo en cuenta que el diámetro del dominio fluido es de 70 m . El resto de los parámetros son definidos por defecto (ver

Ilustración 33).

Details of "Body Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Body of Influence
Bodies of Influence	1 Body
<input type="checkbox"/> Element Size	0,1 m
Advanced	
Size Function	Curvature
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (5,e-003 m)

Ilustración 33 Parámetros utilizados en la operación "Body Sizing"

El mallado resultante presenta una morfología basada en cuadriláteros. El tamaño de malla en el círculo interior es suficientemente pequeño como para adaptarse a los contornos de las velas, y lo que es más importante, el espesor de estas (ver Ilustración 34). Sin embargo, las mallas que adyacentes a los perfiles de las velas son demasiado grandes como para captar los fenómenos de capa límite, hecho que pone en cuestión los resultados de las simulaciones. Las siguientes etapas del modelo de mallado tienen como objetivo mejorar la malla alrededor de los perfiles de las velas.

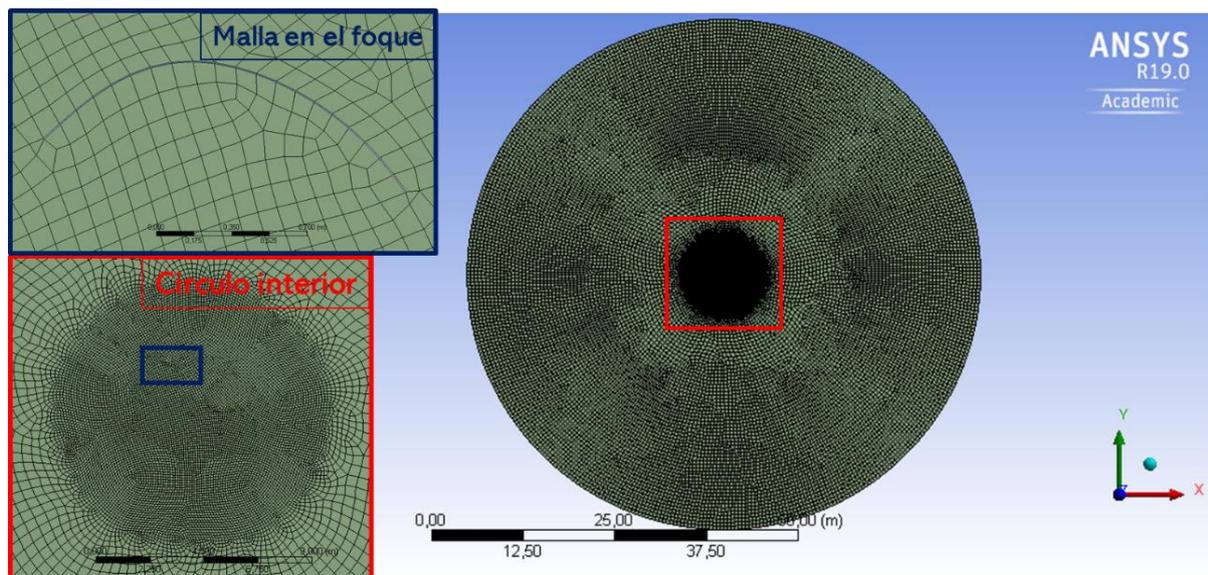


Ilustración 34 Resultado del "Body Sizing" con detalles

3.2.2.2 Mallado en la proximidad de las velas (Inflation)

Mediante la operación "Inflation" se consigue refinar en la dirección normal a la superficie de las velas. Reduciendo de esta forma el ancho de las mallas, se obtendrá más precisión en los valores calculados en torno a los perfiles.

El programa proporciona varias alternativas para definir la operación:

- **Espeor total (*Total Thickness*):** Se fija el número de capas alrededor del contorno, el espeor máximo de la malla (se recomienda definir el espeor máximo de forma coherente al tamaño de elemento existente en las zonas próximas a los perfiles), y la tasa de crecimiento.
- **Espeor de la primera malla (*First Layer Thickness*):** Se fija el espeor de primera línea de mallas situadas en contacto con el perfil, la tasa de crecimiento y el número de mallas de capa límite.
- **Transición suavizada (*Smooth Transition*):** Se fija el número máximo de mallas en la proximidad del contorno, la tasa de crecimiento de las mallas y la ratio de transición.

Se ha utilizado la definición correspondiente al espeor total. Se aplican dos operaciones "Inflation", una para cada vela. La cadena de operaciones es la siguiente:

- Insert → Inflation → Geometry: Volumen-Fluido → Boundary: Contorno_Foque/Contorno_Mayor → Inflation Option: Total Thickness

Los parámetros utilizados se muestran en la Ilustración 35. Esta operación es la principal causa de errores de mallado constatada durante la realización del proyecto. La buena elección de los reglajes es la clave para poder generar mallas sin errores.

Details of "Inflation_foque" - Inflation	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	4 Edges
Inflation Option	Total Thickness
<input type="checkbox"/> Number of Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,1
<input type="checkbox"/> Maximum Thickness	0,1 m
Inflation Algorithm	Pre

Ilustración 35 Parámetros utilizados en la operación "Inflation"

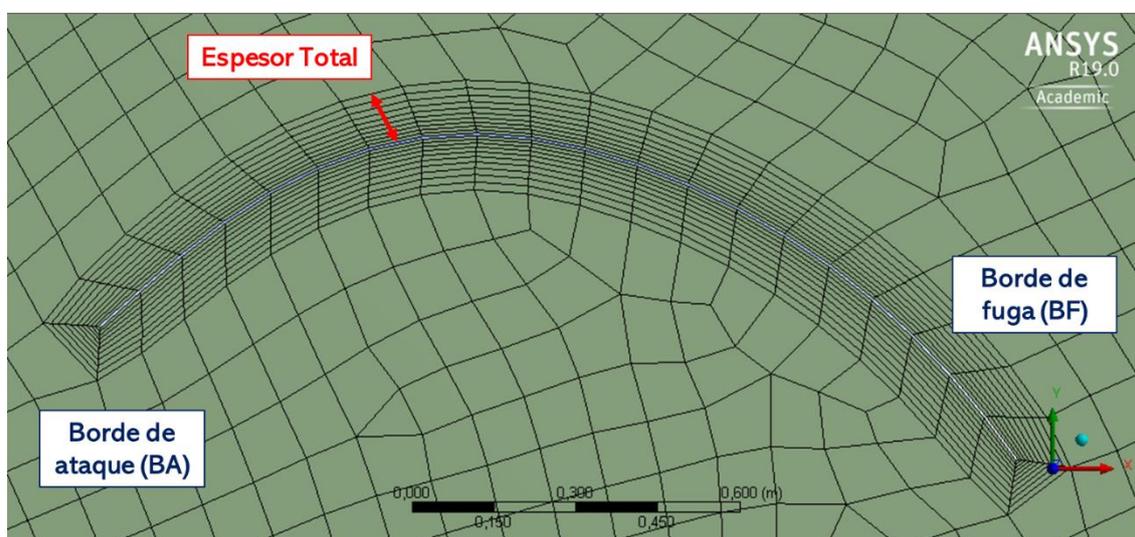


Ilustración 36 Resultado de la operación "Inflation"

El refinamiento localizado obtenido en la proximidad de los contornos de las velas (ver Ilustración 36), aumenta considerablemente la calidad del mallado. Las mallas más problemáticas se encuentran en los dos extremos de las velas. La integración de las capas de malla refinadas en los extremos con el mallado externo es la principal deficiencia del mallado. La morfología del mallado, por tanto, no es lo suficientemente armoniosa en los extremos, esto se debe a los segmentos rectos que unen el contorno intradós y el contorno extradós.

Como perspectiva de mejora en trabajos posteriores, se consideraría el remplazo de los enlaces rectos, por semiarcos o extremos convergentes puntuales. Estas modificaciones modificarían potencialmente la malla como se muestra en la Ilustración 37.

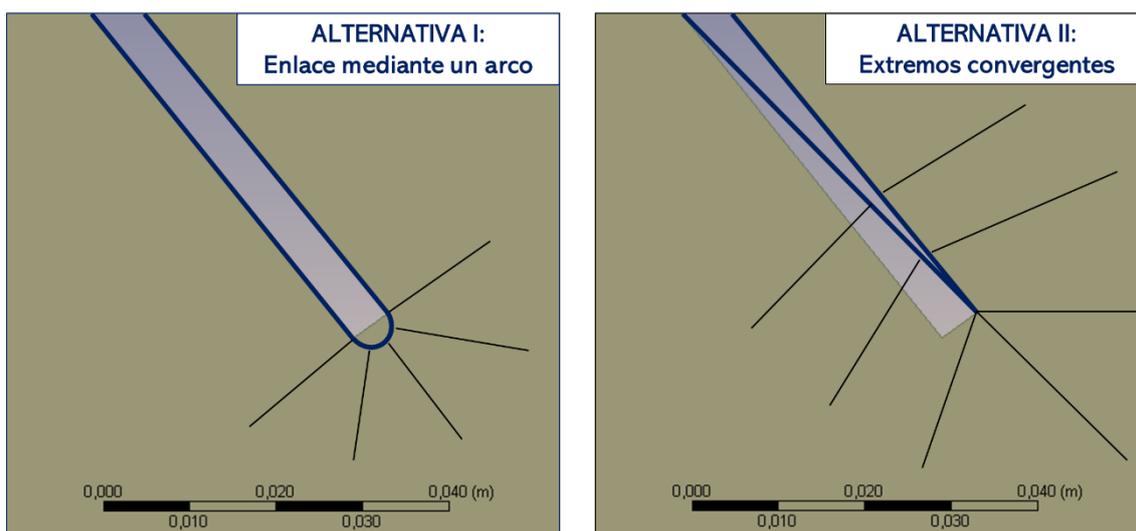


Ilustración 37 Alternativas propuestas para la mejora de la morfología del mallado en los extremos de las velas

3.2.2.3 Refinamiento del mallado según la dirección longitudinal de los contornos (*Edge Sizing*)

La última etapa de la generación del mallado se centra en seguir mejorando las proximidades de las velas. Tras refinar el ancho de las capas de las mallas de capa límite, se debe refinar también las mallas en la dirección longitudinal de las velas. Cuanto mayor sea la discretización del dominio fluido a lo largo de las velas, se obtendrán perfiles de presión más realistas y menos homogeneizados.

La herramienta utilizada para este fin es la operación "*Edge Sizing*". Como su propio nombre indica, esta operación afecta a uno o varios ejes, fijando el número de mallas en que se divide, así como su función de distribución. Se ha fijado un tamaño de elemento en el contorno de 0.05 m, suficientemente reducido al tratarse de velas de una longitud aproximada de 2 m. La función de distribución seleccionada es "*uniform*", ya que no se precisa de refinas de manera exhaustiva ninguna sección concreta del contorno de la vela. El resto de los parámetros de la operación utilizados se encuentran recogidos en la Ilustración 38.

Details of "Foque_extrados_sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Foque_extrados
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	5,e-002 m
Advanced	
Size Function	Uniform
Behavior	Hard
Bias Type	No Bias

Ilustración 38 Parámetros utilizados en la operación "edge sizing"

Se trata cada vela de forma independiente a fin de tener mayor flexibilidad en el mallado. La sucesión de comandos para aplicar la operación “edge sizing” es la siguiente:

- *Insert* → *Edge Sizing* → *Boundary: Contorno_Foque/Contorno_Mayor* → *Type: Element Size* → *Element Size: 0.05 m* → *Size Function: Uniform* → *Behavior: Soft*

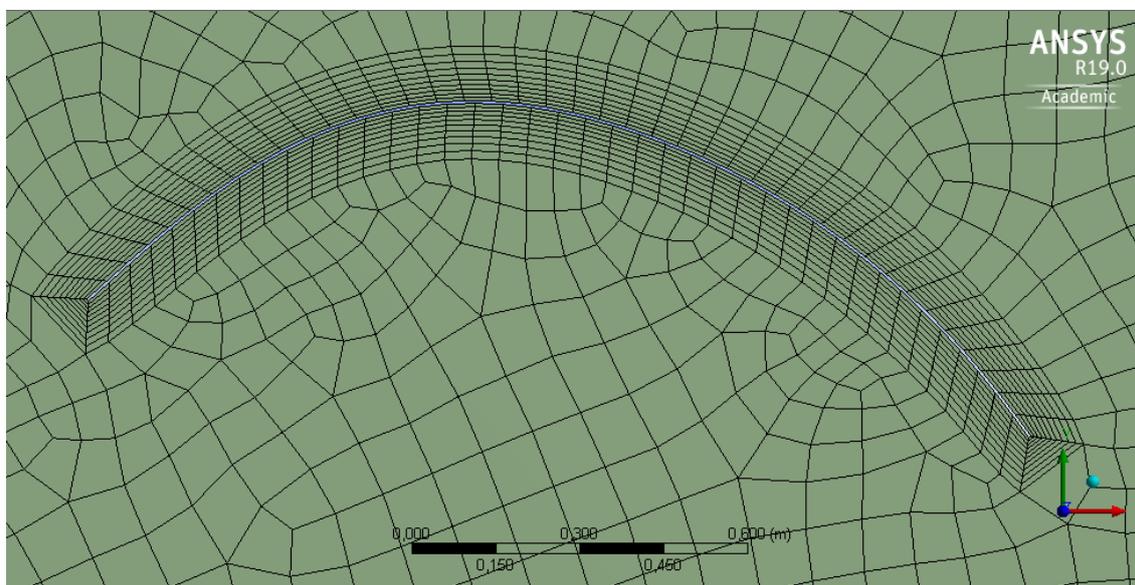
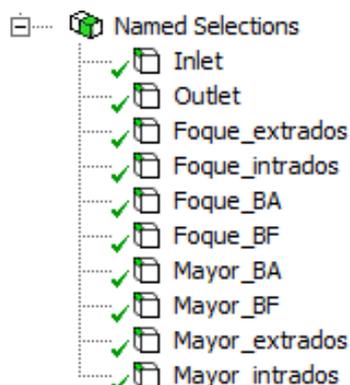


Ilustración 39 Resultado final de la malla generada en torno a una vela

En la Ilustración 39 se muestra el resultado final tras el refinamiento del contorno de las velas.

3.2.2.4 Definición de las secciones

Tras la generación del modelo de mallado completo, se definen las secciones que más tarde servirán para identificar las condiciones de contorno en Fluent, tanto como el post-tratamiento de datos tras la simulación. Esta etapa no es propiamente una fase correspondiente al mallado, sin embargo, debe ser realizada en el entorno del programa “Meshing”. En la Ilustración 40 se muestra el árbol con las diferentes secciones definidas, correspondientes a los contornos de las velas y a la entrada y salida del dominio fluido.



3.2.2.5 Conclusiones del

Ilustración 40 Identificación de las secciones del volumen fluido definidas en “Meshing”

modelo de mallado

El modelo de mallado desarrollado es sencillo desde el punto de vista del número de operaciones (tres tipos de operaciones), esto es una gran ventaja para realizar mallados automáticos cuando la geometría varíe, pues un modelo de mallado complejo implica una menor flexibilidad y adaptabilidad.

La calidad global de la malla es razonable, pues ha posibilitado la convergencia de nuestros cálculos con un nivel de precisión satisfactorio. Por otra parte, existen varios campos de mejora, siendo el más relevante el estudio de la malla en los extremos de las velas.

El modelo con los parámetros encontrados no ha presentado errores en el mallado de los cálculos CFD. Como se ha mencionado anteriormente, la operación más crítica del modelo es la configuración de las capas de mallas más próximas a las velas (apartado 3.2.2.2). Se remarca también la importancia de controlar la malla localizada entre las dos velas, ya que además de ser una zona de vital importancia en la simulación, la malla puede llegar a *retorcerse* si las restricciones fijadas para cada perfil son demasiado estrictas o incompatibles en conjunto.

3.2.3 Modelo en Fluent

Una vez se tiene la geometría del volumen fluido mallada, se procede a definir el modelo en Fluent, donde se configurará la resolución del problema de mecánica de fluidos en dos dimensiones. El solucionador utilizado está basado en la presión, resolviendo el respectivo cálculo estacionario. El sistema de ejes utilizado en Fluent es el mismo que en el módulo “*Design Modeler*” y que en el módulo de mallado “*Meshing*”, por tanto, las velas se encontrarán correctamente orientadas según lo especificado en el archivo de configuración del código C++ para su generación.

La interfaz de Fluent (ver Ilustración 41), presenta al usuario toda la información con las diferentes opciones acerca del modelo en la parte izquierda a modo de árbol jerárquico desplegable (ventana roja). Cada elemento del árbol tiene asociado unas determinadas opciones y parámetros que aparecen en la “*task page*” situada a su derecha (ventana verde). Por último, en la zona derecha se sitúan los gráficos disponibles a petición del usuario.

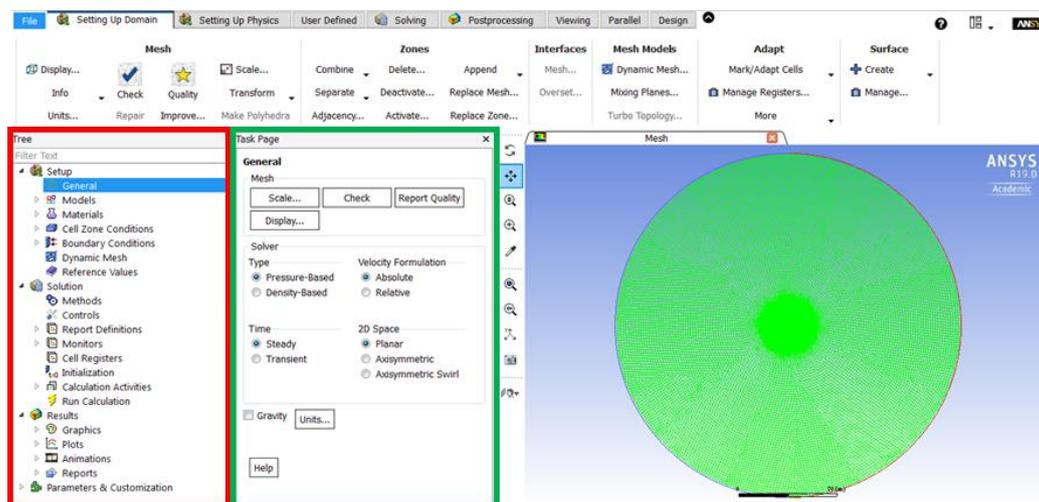


Ilustración 41 Interfaz de Fluent

En el árbol encontramos cuatro grandes grupos:

- **Set-up**: Comprende toda la configuración del modelo que se simulará, se trata del núcleo de la simulación CFD. La configuración comprende la elección de los distintos modelos (energéticos, viscosos, multifase, intercambio de calor etc.) que se verán más adelante, los materiales del modelo (tipo de fluido y material de las paredes del dominio fluido), los valores de referencia de las distintas magnitudes y las condiciones de contorno del caso de cálculo estudiado.
- **Solución**: En este apartado se configura el método de resolución y los controles del cálculo, además de las condiciones de convergencia y de parada, que detendrán la simulación en caso de alcanzarse estas condiciones. Por último, se define el punto de partida del cálculo o la *inicialización* y se lanza la simulación.
- **Resultados**: Referente al tratamiento de la solución del cálculo. Permite presentar los resultados de forma gráfica ya sea mediante contornos de magnitudes o gráficos XY, y también la generación de archivos de resultados.
- **Parámetros**: En este apartado se definen parámetros, que serán exportados a otros módulos de ANSYS. En el proyecto no se ha trabajado en estas opciones.

A continuación, se expondrán los diferentes aspectos del modelo de Fluent utilizado.

3.2.3.1 Aspectos generales del modelo

Se trata de la primera fase de la definición del modelo en Fluent. Se seleccionan las siguientes opciones referentes al solucionador (ver Ilustración 42):

- Tipo de *solucionador basado en la presión* en detrimento del basado en la densidad, debido a las propiedades del fluido y del modelo de viscosidad [3].
- *Formulación de la velocidad absoluta*, pues se trabaja directamente con la velocidad aparente del viento sobre el velero.
- *Régimen temporal estacionario*. El ámbito de estudio del proyecto comprende solamente cálculos estacionarios.
- Espacio *2D de tipo plano*, ya que el dominio fluido no dispone de ejes de simetría.
- *Campo gravitatorio desactivado*, pues no es pertinente en el estudio de perfiles de vela.

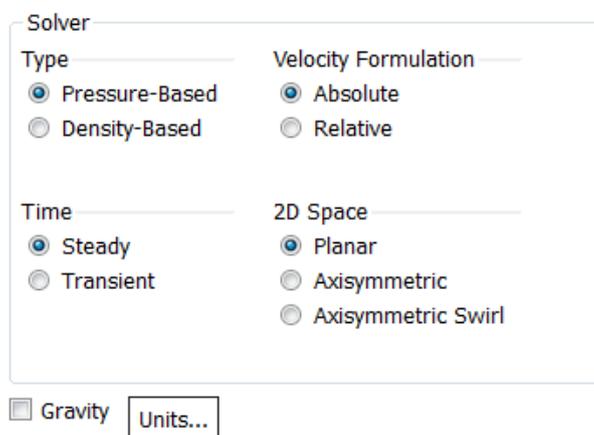


Ilustración 42 Parámetros generales del modelo Fluent

3.2.3.2 Flujo simulado

El fluido que se simulará es el aire de la atmósfera a nivel del mar. Las propiedades del fluido son definidas como constantes, ya que esta elección simplifica el proceso de cálculo. Los resultados obtenidos no se verán afectados por la aceptación de esta hipótesis, pues el entorno del problema a estudiar valida estas aproximaciones [4]. Las propiedades del aire simulado son las fijadas por defecto en Fluent:

- Densidad (ρ) = 1,225 Kg/m³.
- Calor específico (C_p) = 1006,43 J/(Kg·K).
- Viscosidad (μ) = 1,7894·10⁻⁵ Kg/(m·s).

El tipo de flujo es un motivo por el cual se elige el solucionador basado en presión [4]⁵.

3.2.3.3 Valores de referencia (Reference Values)

Los valores de referencia son utilizados para calcular los valores del *postprocesado*, además de para definir las condiciones de contorno del modelo a partir de ellos [4]. Los valores definidos utilizados son:

- Área (A) = 1 m².
- Densidad (ρ) = 1.225 Kg/m³.
- Profundidad (z) = 1 m.
- Entalpía (h) = 0 J/Kg.
- Longitud (L) = 1 m.
- Presión (P) = 0 Pa.
- Temperatura (T) = 288.16 K.
- Velocidad (v) = 1 m/s.
- Coeficiente de dilatación adiabática (γ) = 1.4.
- Zona de referencia → *Volumen_Fluido*

La presión de referencia es definida como nula, esto implica que en el transcurso del proyecto se trabajará siempre con presiones absolutas.

3.2.3.4 Condiciones de contorno (Boundary Conditions)

Mediante la definición de las condiciones de contorno, se describen las fronteras del modelo, tanto las externas como las internas, además del dominio fluido interno sobre el cuál se realizará el cálculo. Fluent importa cada una de las fronteras de la geometría mallada, a la espera de que sean definidas las condiciones de contorno. Para los cálculos realizados durante el proyecto, se han definido las siguientes:

⁵ Fluent User's Guide, apartado 33.12. Reference Values

- **Dominio fluido (*volumen fluido*):** se refiere a todas las celdas interiores que forman parte del dominio fluido, a excepción de los contornos externos e internos (ver Ilustración 43). Se le asigna de forma automática la condición de contorno de tipo interior.

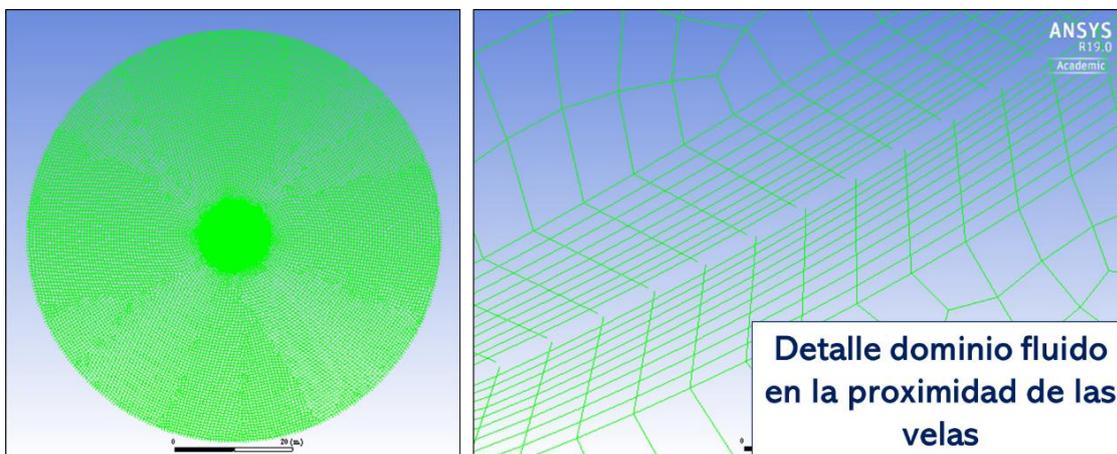


Ilustración 43 Volumen fluido interno sin fronteras externas (contorno exterior) ni fronteras internas (contornos de las velas)

- **Entrada (*inlet*):** Se define como una condición de contorno de tipo “*velocity-inlet*”. Se utiliza el método de especificación de la velocidad de magnitud y dirección. El valor de la velocidad del aire a la entrada será el mismo en todos los cálculos efectuados en el proyecto e igual a 10 m/s. Por otra parte, la dirección se define mediante un vector de coordenadas “X” e “Y”, como será la orientación de las velas la que se modifique para los distintos casos de estudio, la dirección de la velocidad se mantiene fija según la dirección positiva del eje horizontal (vector de dirección (1,0)).
- **Salida (*outlet*):** Se define como una condición de contorno del tipo “*pressure-outlet*”. Está caracterizada mediante el valor de la presión estática absoluta, correspondiente a la presión atmosférica i.e. 101325 Pa. Fluent ofrece una serie de métodos para establecer la dirección de la presión a la salida, en nuestro la presión a la salida será normal al contorno (opción *normal to boundary*), por lo que no se precisa de definir ningún vector de dirección.
- **Contorno de las velas:** Cada contorno está formado por cuatro “*named sections*” definidas en el apartado 3.2.2.4. Estas son el cada caso, los contornos extradós e intradós de las velas, y los dos segmentos de unión a cada extremo de la vela. Los contornos de las velas suponen las fronteras interiores del dominio fluido, por lo que la condición de contorno impuesta es la de pared “*wall*” sin deslizamiento. De esta forma se simula la influencia de un cuerpo sólido en el seno del dominio fluido como es la vela.

Tras fijar las condiciones de contorno de todos los elementos inherentes a la geometría mallada, se debe obtener un resultado equivalente al que se muestra en la Ilustración 44.

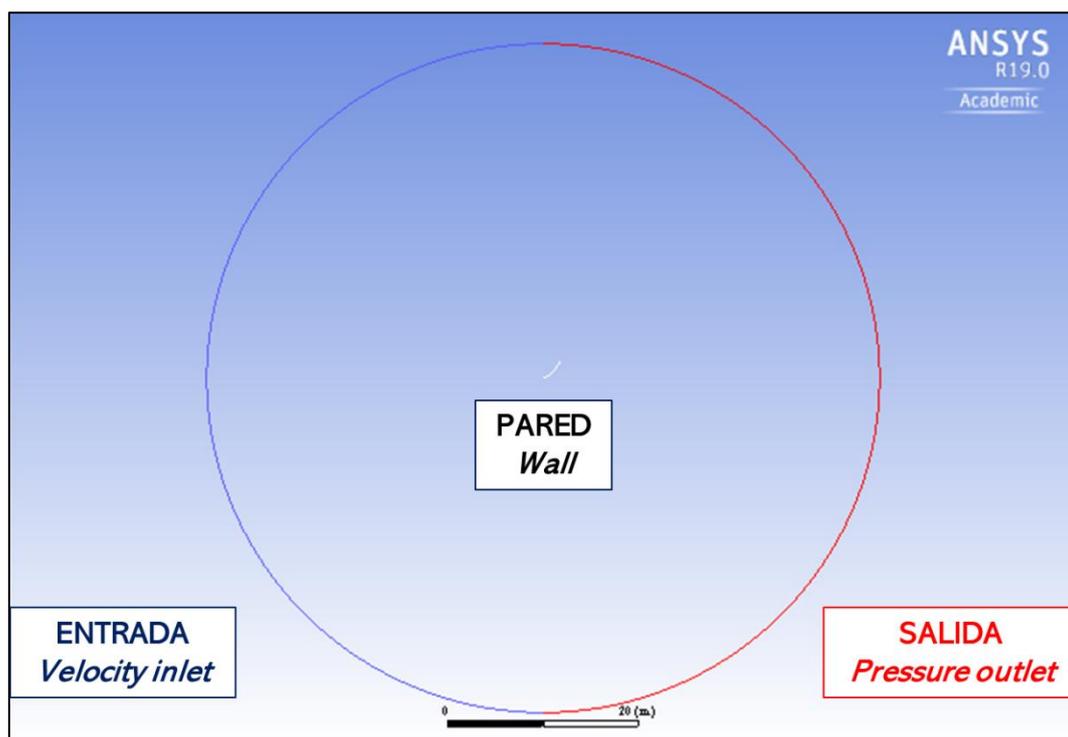


Ilustración 44 Condiciones de contorno fijadas en el modelo Fluent

3.2.3.5 Modelo de turbulencia

Fluent permite implementar diferentes modelos de turbulencia. Cabe recordar que la turbulencia es considerada en CFD como un fenómeno que se rige de manera estadística. Cuanto más preciso sea el modelo de turbulencia que se utilice en los cálculos, mayor será el tiempo CPU requerido. Adicionalmente, los modelos más precisos, como el $k-\omega$ Wilcox con dos ecuaciones, precisan de modelos de mallados de excelente calidad, además de una malla alrededor de los perfiles muy refinada para poder converger los cálculos [2]. Los modelos de turbulencia disponibles de máximo dos ecuaciones de transporte⁶ son los siguientes:

- **Inviscid**: Fluido sin viscosidad, no existe disipación de la energía cinética de los vórtices.
- **Laminar**: Se considera el flujo como laminar. Para poder aplicar este modelo, debemos conocer el valor del Reynolds (Re) en torno a los perfiles de vela.
- **Spalart-Allmaras**: Es un modelo de turbulencia que introduce una ecuación de transporte para la viscosidad cinemática turbulenta. Originalmente este modelo requería una buena simulación del efecto de la viscosidad en la capa límite para proporcionar buenos resultados, i.e. un óptimo tratamiento de pared (y^+ de una malla aproximadamente). Actualmente el modelo ha sido modificado en ANSYS Fluent, extendiéndose su aplicación para todo tipo de tratamiento de pared [4].
- **K-ε**: Es el modelo de turbulencia más ampliamente utilizado en las simulaciones CFD. Incluye dos ecuaciones de transporte adicionales sobre las variables a las que debe su denominación:

⁶ Los modelos de turbulencia más completos, que incluyen más de dos ecuaciones de transporte, no han sido considerados, ya que no se ajustan a las necesidades concretas del presente proyecto.

- Energía cinética turbulenta (k).
- Tasa de disipación de energía turbulenta (ε).
- **$K-\omega$** : Se trata también de un modelo con dos ecuaciones. El modelo trata de predecir la turbulencia con dos ecuaciones diferenciales parciales referidas a las variables que dan el nombre al modelo [4]:
 - Energía cinética turbulenta (k).
 - Tasa específica de disipación de la energía cinética turbulenta (ω).

A fin de definir el modelo de turbulencia que se utilizará en el cálculo CFD, se debe conocer previamente las características del flujo a estudiar. Para ello se calculará el Reynolds (Re) relativo al flujo externo del contorno de la vela:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 10 \cdot 2,5}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 1,7 \cdot 10^6 \quad (1.34)$$

Donde:

- ρ : Densidad del aire en Kg/m^3 .
- v : Velocidad global del fluido en m/s .
- c : Dimensión característica del problema en *metros*, en este caso la cuerda de la vela mayor.
- μ : Viscosidad del fluido en $Kg/(m \cdot s)$.

En el escenario que nos atañe, la transición entre régimen laminar y turbulento se produce en torno a un orden de magnitud del Reynolds de $2 \cdot 10^4$. El Reynolds que caracteriza el problema es ampliamente superior a $2 \cdot 10^4$, esto es una evidencia de que el flujo es turbulento completamente desarrollado [1].

Tanto el modelo “*Inviscid*”, como el modelo laminar son descartados tras comprobar mediante la verificación del Reynolds que el flujo sufre un desarrollo turbulento. Se decide implementar en los cálculos el modelo de turbulencia de “*Spalart-Allmaras*”, por ser el más sencillo capaz de cubrir las necesidades del proyecto [1].

3.2.3.6 Algoritmo de resolución e inicialización del cálculo

Para seleccionar el algoritmo de resolución, se ha intentado, en primera instancia, no perjudicar el coste computacional. Se ha elegido el esquema de resolución acoplado, ya que el esquema simple presenta ciertos problemas de convergencia [1]. El resto de los parámetros del algoritmo de resolución respecto a la discretización espacial, son los definidos por defecto en Fluent, pues no ha sido preciso su estudio en las simulaciones realizadas en el proyecto (ver Ilustración 45).

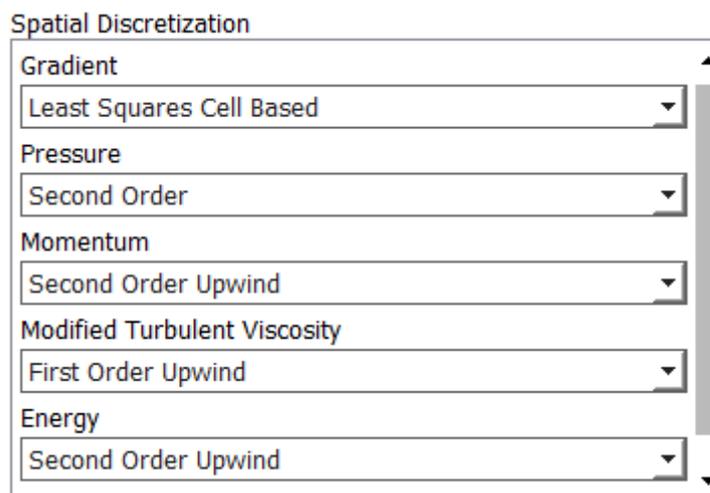


Ilustración 45 Parámetros de discretización espacial seleccionados en el algoritmo de resolución de Fluent

En cuanto a la inicialización de los cálculos, referida a los valores de las propiedades fluidas en la primera iteración del cálculo, se selecciona el método estándar en detrimento del método híbrido. Los valores son computados a partir de la entrada del volumen fluido (“Inlet”) [5].

3.2.3.7 Procedimiento del cálculo y condiciones de convergencia

El modelo de Fluent detallado en los apartados anteriores, es el implementado para las simulaciones. La necesidad de utilizar un modelo robusto, sin problemas de convergencia para determinados casos o geometrías de estudio, ha llevado a dividir el proceso en dos etapas, que afectan al modelo de turbulencia:

1. **Cálculo inicial con modelo de turbulencia “inviscid”:** En un primer momento, se lanza el cálculo con el modelo de turbulencia más simple disponible, el correspondiente al fluido sin viscosidad. Este modelo no es capaz de predecir de forma realista el comportamiento del fluido en las proximidades de los perfiles de las velas (perfiles de presión estática en los contornos de las velas poco fiables), sin embargo, presenta una buena resolución en términos globales con un coste de cálculo reducido. El principal interés de lanzar el cálculo, implementando un modelo simplista, reside en la obtención de un punto de partida óptimo, desde el que comenzar el cálculo con el modelo completo (segunda etapa).
2. **Cálculo final con el modelo de turbulencia “Spalart-Allmaras”:** Esta segunda etapa, comienza justo a continuación de la etapa anterior, utilizando de esta forma los resultados obtenidos previamente como *inicialización*. De esta forma se garantiza una mayor calidad en la resolución numérica, con la correspondiente reducción del tiempo CPU global de ambas etapas, además de limitar los posibles problemas de convergencia de los cálculos con el modelo de turbulencia “Spalart-Allmaras”.

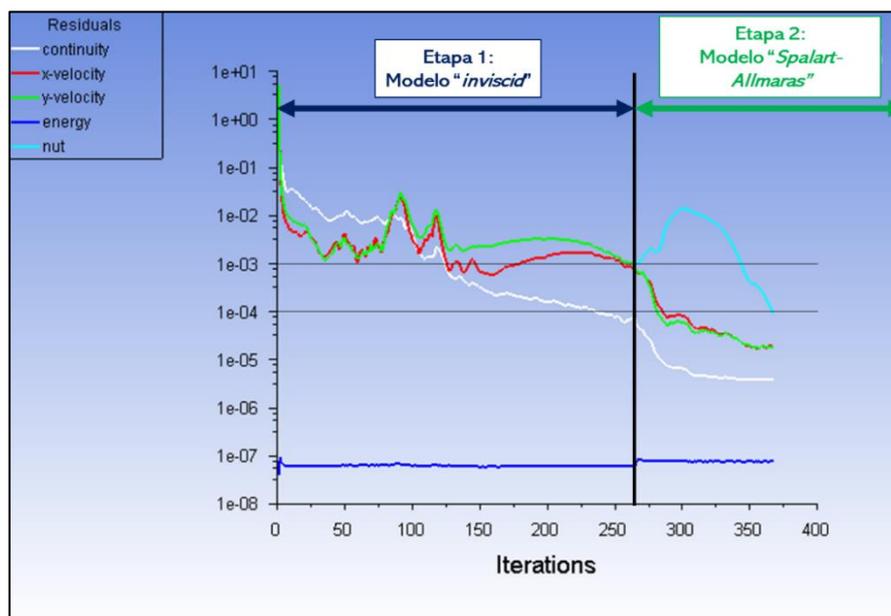


Ilustración 46 Evolución de los residuales del cálculo completo con las dos etapas correspondientes a los diferentes modelos de turbulencia

En la Ilustración 46 se muestra la evolución de los residuales a lo largo de una simulación completa. Se pueden apreciar las dos etapas de cálculo implementadas. La simulación presenta cuatro residuales comunes, presentes durante todo el proceso:

- Residual de continuidad en masa (*Continuity*).
- Residual de velocidad en la dirección horizontal (*X-Velocity*).
- Residual de velocidad en la dirección vertical (*Y-Velocity*).
- Residual de energía (*Energy*).

Se utiliza un criterio de convergencia absoluto para estos residuales de valor $1 \cdot 10^{-3}$ en todos los casos, a excepción del residual de energía, fijado a $1 \cdot 10^{-6}$. Una vez que los residuales descienden por debajo del criterio, la simulación se detiene admitiendo la convergencia del cálculo iterativo.

Se destaca que la satisfacción del criterio de convergencia no implica necesariamente que el cálculo haya convergido hacia una solución determinada. El usuario debe de comprobar que el comportamiento de todos los residuales sigan una tendencia de disminución.

Una vez que el cálculo con el modelo de viscosidad nula ha llegado a una solución, se modifica el modelo de Fluent implementando el modelo de turbulencia, relanzando la simulación a partir del resultado obtenido en la primera etapa. Muestra de ello es la continuidad de los residuales entre los dos *subcálculos* (ver Ilustración 46).

El modelo de turbulencia "*Spalart-Allmaras*" introduce una nueva definición de residual:

- Residual de viscosidad cinética turbulenta (*nut*).

El criterio de convergencia de este último residual es fijado también de manera absoluta a un valor igual a $1 \cdot 10^{-4}$. El valor por defecto del criterio de convergencia es $1 \cdot 10^{-3}$, la

modificación de este responde a la necesidad de asegurar la convergencia de la solución de la simulación⁷.

2.2.3.8 Generación de los ficheros de presión resultados

Tras concluir el cálculo resultado del estudio aerodinámico de una determinada geometría de velas, se deben de extraer los perfiles de presión a ambos lados de las velas, para realimentar toda la cadena de cálculo, y generar así, nuevos perfiles de vela que se someterán a estudio en una nueva iteración.

Como se expuso en el apartado 3.1.4.2, el modelo en Fluent generará cuatro ficheros de presión estática correspondientes al intradós y al extradós de cada una de las velas. La definición de estos archivos se realiza en la etapa de post-procesado o de análisis de resultados ("*Results*"), siguiendo la siguiente secuencia de operaciones para cada uno de los cuatro contornos:

- *Results* → *Plots* → *XY Plot* → *New...* → *Y Axis Function: Static Pressure* → *X Axis Function: Curve Length* → *Surfaces: foque/mayor-intradós/extradós* → *Write to File*

Los resultados serán actualizados a la conclusión de cada simulación CFD de forma automática, sin embargo, la generación de los ficheros resultados deberá ser realizada por el usuario para cada solución alcanzada.

⁷ En algunos cálculos el primer valor del residual "*nut*", es menor al valor del criterio de convergencia absoluto (10^{-3}), por lo que la simulación se detiene aún si el residual está creciendo.

4. MANUAL DE USUARIO

Este capítulo sirve de guía de utilización de la herramienta desarrollada a partir del modelo completo detallado en el capítulo 0. Se presentan las pautas a respetar, así como la interpretación de los resultados obtenidos.

4.1 Inicialización de la generación de la geometría

Como se ha visto en el apartado 3.1.4.2, la generación de la geometría de las velas mediante el código *C++* desarrollado, requiere de un fichero de configuración con los diferentes parámetros de trimado, además de los ficheros de presión extradós e intradós para cada una de las dos velas. Estos archivos de entrada se deben encontrar en el mismo directorio que el ejecutable del código ("*ConversorPerfiles.exe*").

El fichero de texto con los parámetros de trimado relativos al velero y al reglaje de las velas es suministrado por el usuario con los datos que se muestran en la Ilustración 47. Se deben de respetar los nombres asignados para cada parámetro, a fin de que el código pueda leerlos y almacenarlos correctamente.

Configuración

```
LongitudMayor=2.55
LongitudFoque=2.
XpoleaFoque=3.85
YpoleaFoque=0.2
LongitudEscota=4.8
Npts=200
AnchoVela=0.005
LongitudBotavara=2.5
AnguloBotavara=50.
AnguloDireccion=45.
DistanciaFoqueMayor=2.65
```

Ilustración 47 Fichero de configuración de la simulación

La generación de los perfiles de vela para la primera iteración del modelo presenta la problemática añadida de no disponer de ficheros solución relativos a la presión estática en las velas. Por tanto, los ficheros de presión son generados manualmente por el usuario con las siguientes características:

- El formato de los ficheros de texto se corresponde a aquel generado por Fluent.
- Los perfiles de presión estáticos a cada lado de la vela son constantes a lo largo de la longitud de cada contorno.
- La diferencia de presión (ΔP) entre los dos contornos es de $100 Pa$ [1], traducido esto en una sobrepresión dirigida desde el lado intradós hacia el extradós.
- Por simplicidad, los ficheros de inicialización sólo recogen la presión estática en dos puntos de cada contorno, correspondientes a los extremos. El código interpolará los valores para cada uno de los puntos en los que se discretiza la generación de los perfiles.

En la Ilustración 48 se muestran los ficheros de presión estática utilizados para inicializar los cálculos realizados en el cuadro del proyecto.

Presión Intradós

```
(title "Static Pressure vs. Curve Length")
(labels "Curve Length" "Static Pressure")

((xy/key/label "foque_intrados")
0 300
1.99995 300
)
```

Presión Extradós

```
(title "Static Pressure vs. Curve Length")
(labels "Curve Length" "Static Pressure")

((xy/key/label "foque_extradós")
0 200
2.00528 200
)
```

Ilustración 48 Ficheros de inicialización de la presión estática para una vela (foque). a) Presión en el lado intradós, b) Presión en el lado extradós

Para los casos de cálculo en los que se prevé la existencia de una diferencia de presión intradós-extradós negativa, i.e. la presión en el contorno extradós es superior a la existente en el contorno intradós, se notifica el interés de utilizar ficheros de inicialización con diferencia de presión negativa. Esta medida implica la aceleración de la convergencia del bucle de cálculo hacia los perfiles correspondientes, reduciéndose el número de iteraciones completas necesarias.

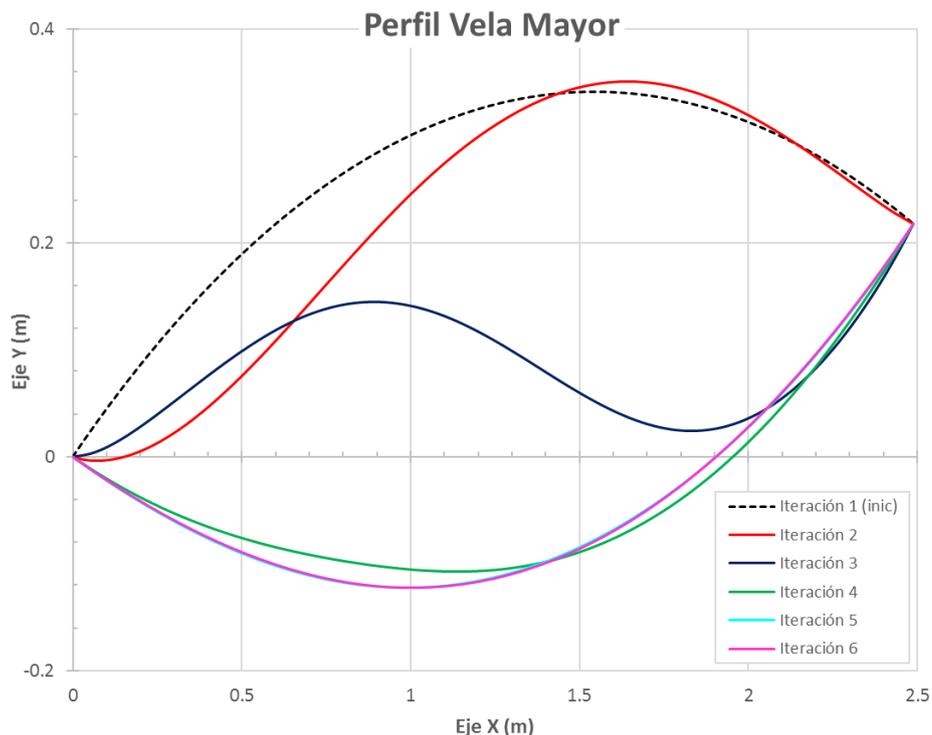


Ilustración 49 Perfiles de la vela mayor generados en las diferentes iteraciones de cálculo efectuadas

En la Ilustración 49 se muestra la evolución del perfil de la vela mayor en las distintas iteraciones de cálculo realizadas. Los ficheros de inicialización se corresponden con un ΔP positivo (contrario a lo esperado en la simulación). Las primeras tres iteraciones del cálculo modifican progresivamente el perfil de la vela según las presiones obtenidas de las simulaciones, hasta llegar a geometrías correspondientes a perfiles de presión con ΔP inversos (ver Ilustración 50).

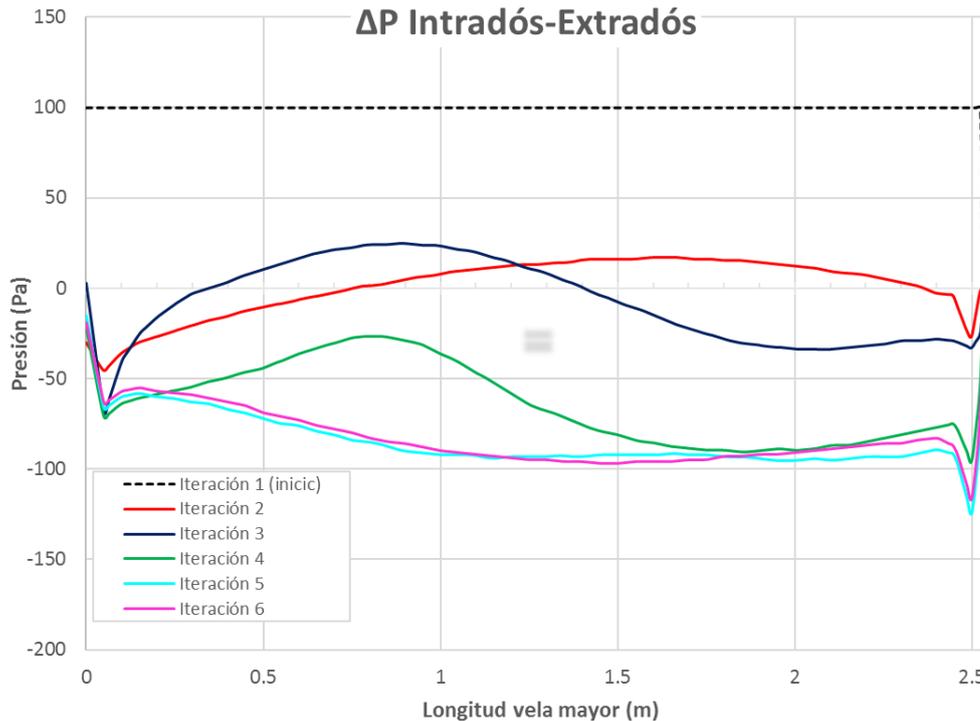


Ilustración 50 Perfiles de la diferencia entre la presión del contorno intradós y el contorno extradós obtenidos en las simulaciones CFD de cada iteración

Estas primeras iteraciones de cálculo se pueden evitar, inicializando con los *ficheros de presión inversa*. De esta forma, al comenzar el bucle con geometrías de perfiles coherentes a las condiciones del flujo en el que se simulará (dirección del viento aparente), se requerirán menos iteraciones hasta que los perfiles de presión hayan convergido.

4.2 Ejecución del programa de generación de perfiles

Una vez preparados los ficheros de entrada en el mismo directorio que ejecutable del código, el programa de generación de perfiles de vela es ejecutado mediante el procesador de comandos de Windows⁸.

Se debe de suministrar el directorio del ejecutable junto al identificador que aparece al comienzo de la denominación de los ficheros de presión y de configuración.

Al finalizar la ejecución del programa sin ninguna incidencia, se obtendrán cuatro ficheros de texto resultado con las coordenadas de cada uno de los contornos de las velas, siguiendo el formato expuesto en el apartado 3.1.4.2.6 para posteriormente ser importados en ANSYS Fluent. Los ficheros resultados serán los siguientes:

- Contorno intradós del foque (*path_intraF_XY.txt*).
- Contorno extradós del foque (*path_extraF_XY.txt*).
- Contorno intradós de la vela mayor (*path_intraM_XY.txt*).
- Contorno extradós de la vela mayor (*path_extraM_XY.txt*).

⁸ Cmd.exe

Adicionalmente se genera un fichero de resultados, que recoge una recopilación de las coordenadas de los cuatro contornos generados, así como de la diferencia de presión a cada lado de la vela utilizadas para crear los perfiles. El interés de este archivo reside en el análisis de la evolución de cada iteración del cálculo por parte del usuario.

En el caso de que el programa no haya sido capaz de calcular alguno de los dos perfiles, este generará un fichero de error (ErrorFoque.txt o ErrorMayor.txt según el perfil problemático). Este fichero recoge la misma información que el fichero con los resultados finales, lo que puede ayudar a interpretar la no convergencia de los bucles de ajuste de los perfiles de las velas (ver apartado 3.1.4.2.3).

Nota: La causa principal que ha impedido la convergencia de los bucles de ajuste de los perfiles de las velas, ha sido la utilización de ficheros de presión incorrectos. Se debe verificar que la solución de Fluent está actualizada (“Update”), antes de exportar los ficheros con las presiones estáticas, en caso contrario, los archivos exportados recogen presiones nulas a ambos lados de las velas.

4.3 Lanzamiento de los cálculos CFD

La simulación de un caso de cálculo se genera según lo detallado en el apartado 3.2. Los pasos que efectuar en ANSYS para cada iteración son los siguientes:

1. Relectura de los ficheros de contornos importados y actualización del modelo en “DesignModeler”.
2. Actualización del mallado de la nueva geometría.
3. Lanzamiento de la simulación CFD.
4. Actualización de la solución encontrada.
5. Actualización de los ficheros y datos extraídos de la solución.

Cuando se tenga el proyecto de Fluent configurado, se debe de indicar el directorio de los ficheros con las coordenadas de los contornos de las velas en el módulo “Design Modeler”. Para relanzar el modelo en Fluent con una nueva iteración, es necesario releer el fichero especificado, activando la opción “Refresh” en cada una de las curvas importadas (ver Ilustración 51).

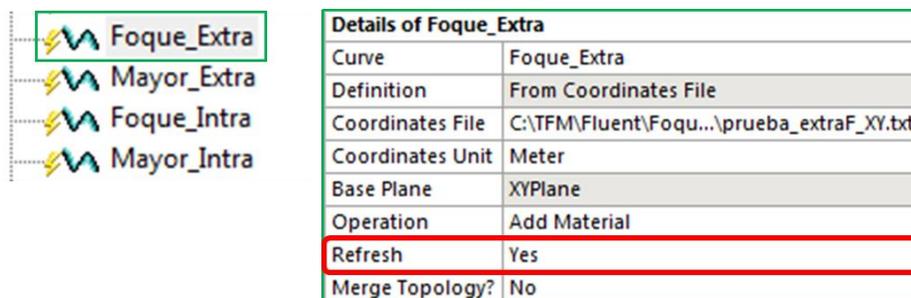


Ilustración 51 Activación de la opción “Refresh” para cada curva importada a partir de ficheros de texto

➤ SCRIPT ANSYS

Tras actualizar la geometría, los siguientes pasos son realizados automáticamente por ANSYS, gracias a la ejecución de un “script” desarrollado en el proyecto. El *script* es un fichero o archivo de órdenes donde se recogen las órdenes que se realizarán en el entorno de ANSYS. Esta alternativa economiza enormemente el tiempo empleado en la preparación de las simulaciones CFD.

La ejecución del script correspondiente se realiza mediante las siguientes operaciones:

- *File* → *Scripting* → *Run Script File...* → *Selección del script correspondiente (ScriptFluent.wbjn)*

El script está programado para realizar los cálculos implementando consecutivamente los dos modelos de turbulencia utilizados (ver apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Una vez la ejecución concluye, se dispone de la solución de la simulación CFD correctamente actualizada, desde donde se podrán extraer los diferentes resultados y

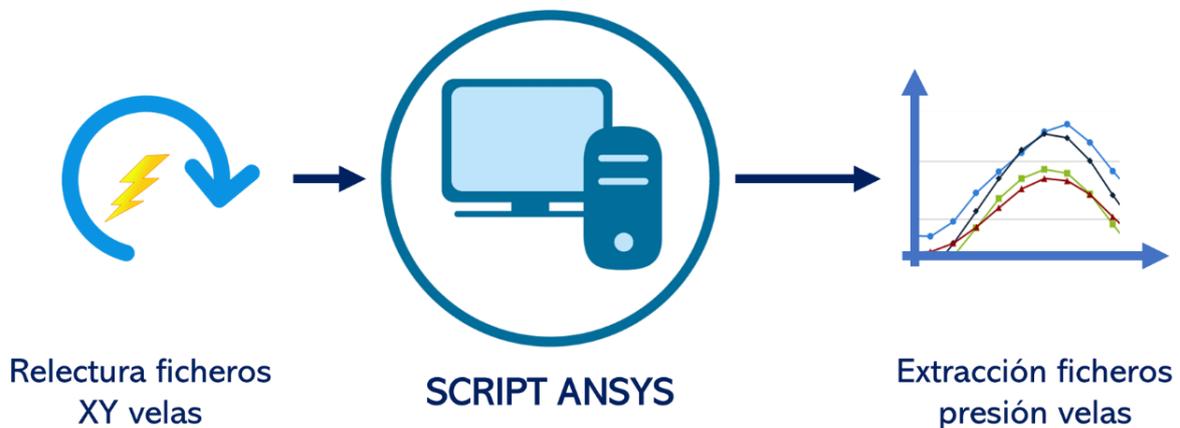


Ilustración 52 Esquema de lanzamiento de las simulaciones CFD

magnitudes de interés.

En la Ilustración 52 se muestra el procedimiento seguido en el entorno de ANSYS para realizar las simulaciones CFD de los perfiles de vela. La relectura de los ficheros de contornos y la extracción de los ficheros de presión con los que se realimenta el modelo de generación de perfiles, son las únicas operaciones que no se han logrado incorporar en el *script*. La integración de todas las operaciones realizadas en ANSYS en el archivo de órdenes supone un gran avance en relación con la automatización final de la cadena de cálculo completa, siendo por ello, un claro punto de mejora en estudios posteriores.

4.4 Criterio de parada de la cadena de cálculo

El funcionamiento de la cadena de cálculo completa está gestionada por el usuario, ya que no se ha llegado a integrar todo el proceso de forma automática. En el estudio de un caso concreto para unas condiciones de flujo y unos reglajes de navegación determinados, se deben realizar iteraciones de la cadena completa hasta que la presión estática obtenida como resultado converja, i.e. coincida con las presiones estáticas calculadas en la iteración

anterior. Es necesario por tanto realizar un historial de los cuatro ficheros resultado de la presión estática de las velas.

La estrategia empleada en las simulaciones efectuadas durante el proyecto compara la presión intradós-extradós en cada punto de la vela obtenidos en la correspondiente iteración con aquellos obtenidos en la iteración anterior. Se define el residual de presión en una iteración “i” de la siguiente forma:

$$Residual\ Presión_i (Pa) = \frac{\sum_{j=1}^{N_{pts}} [\Delta P_i(j) - \Delta P_{i-1}(j)]}{N_{pts}} \quad (4.1)$$

Donde:

$$\Delta P (Pa) = P_{intradós} - P_{extradós} \quad (4.2)$$

La solución de los cálculos es validada cuando el residual de presión tanto del foque como de la vela mayor es inferior a 3 Pa, esto significa que la desviación promedia entre los valores de presión estática de las dos últimas iteraciones difiere menos de 3 Pascales. Adicionalmente se recomienda visualizar los perfiles de presión de las distintas iteraciones (ver Ilustración 54), para así evaluar si existen desviaciones locales anormales. En la Ilustración 53 se muestra la evolución de los residuales de ambas velas para distintas iteraciones de un caso de cálculo determinado. Como norma general se han precisado de cinco ciclos completos de cálculo para converger hacia una determinada geometría de vela, excepto en casos extremos de difícil convergencia donde se ha requerido un mayor número de iteraciones.

Iteració n	Residual Foque	Residual Mayor	Sumatori o
1	-	-	-
2	39.38	57.63	97.01
3	13.66	10.21	23.88
4	3.03	1.29	4.33
5	1.68	0.67	2.36

Ilustración 53 Evolución de la convergencia de la cadena de cálculo

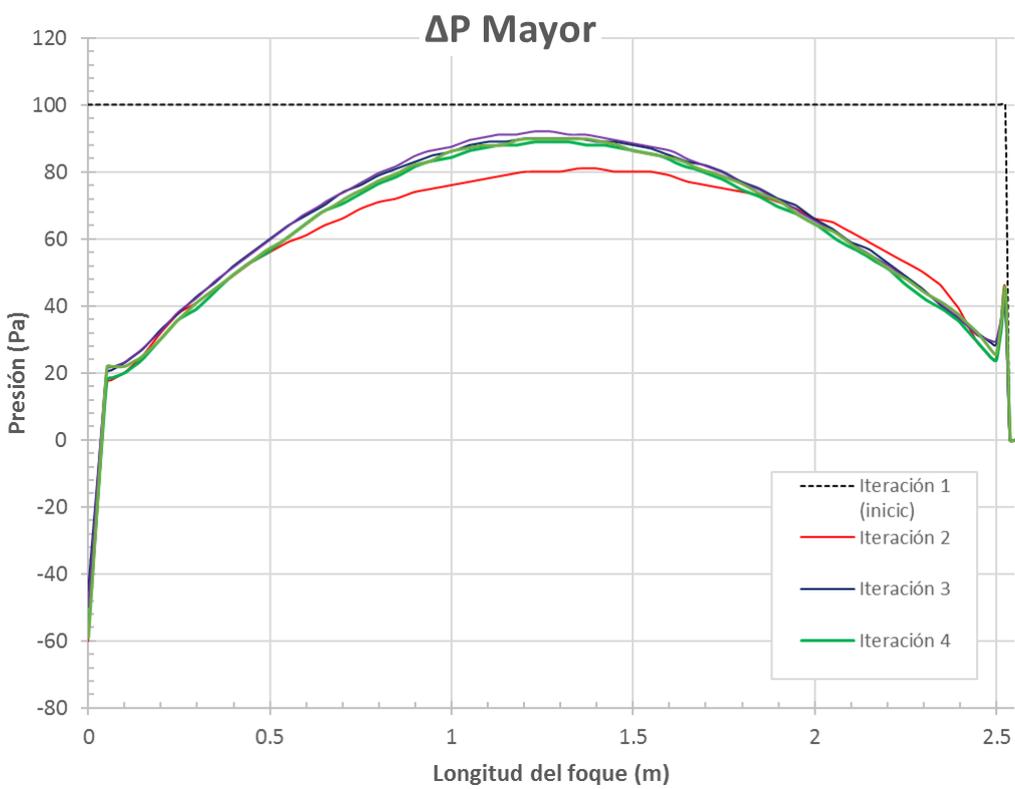
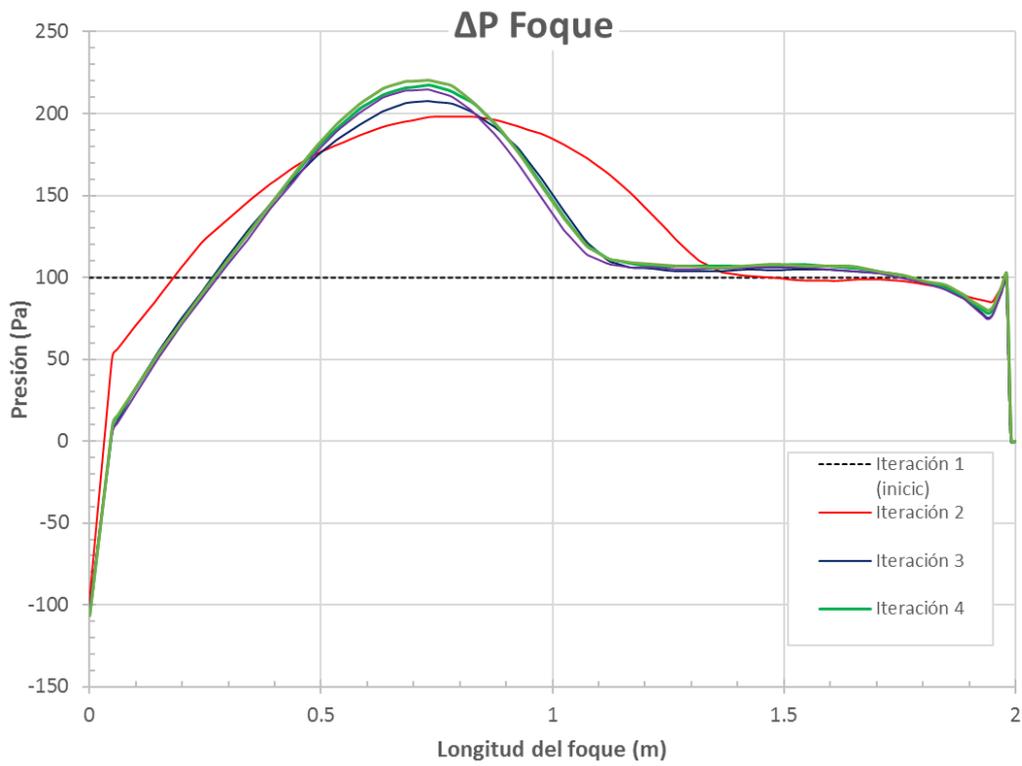


Ilustración 54 Evolución de las presiones estáticas para distintas iteraciones. a) Diferencia de presión intradós-extradós del foque, b) Diferencia de presión intradós-extradós de la mayor

5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Planteamiento de las simulaciones realizadas

Con el objetivo de validar la herramienta desarrollada durante el proyecto, se vuelve fundamental la obtención de resultados y su respectivo análisis.

El estudio se realiza en dos dimensiones, por lo que la dirección correspondiente a la altura (Z) no es considerada. La geometría de las velas de un velero no conserva un perfil constante, siendo variable respecto a la coordenada " Z ", esto obliga a centrar el estudio de las secciones de las velas situadas a una altura determinada, optando finalmente por la base de las velas⁹. La longitud de los perfiles de las velas en esta posición se recoge en la Ilustración 55.

Tipo de vela	Longitud (m)
Foque	2
Mayor	2,55

Ilustración 55 Longitud de las velas en la sección inferior

La nueva cadena de cálculo con dos velas permite el estudio de una gran variedad de configuraciones posibles respecto al modelo utilizado previamente de una sola vela [1]. Los parámetros que caracterizarán las simulaciones son:

- Velocidad del viento (v) en m/s.
- Ángulo de dirección del velero (φ) en grados respecto de la horizontal.
- Longitud de la escota (L_{escota}) en metros.
- Ángulo de la botavara (α) en grados respecto al eje longitudinal del velero.
- Longitud de la botavara ($L_{botavara}$) en metros.

Al ser el primer modelo desarrollado con dos velas, se prioriza la realización de simulaciones que muestren la influencia e interacción de ambas velas. Por este motivo, se decide analizar la posición de las velas bajo unas determinadas condiciones de navegación fijas, reduciendo el número de parámetros de trimado a dos variables, la longitud de la escota (L_{escota}) y el ángulo de la botavara (α).

Las condiciones de navegación (velocidad del viento y ángulo de dirección) son fijadas de modo que interfieran lo menor posible en las conclusiones extraídas de las simulaciones. La velocidad del viento (v) se establece en 10 m/s , mientras que el ángulo de dirección (φ) se

⁹ Se ha realizado el estudio de los perfiles de las velas situados en la parte inferior, ya que se disponía de medidas relativas a las velas en estas secciones. El mayor interés reside en el estudio de los perfiles de las velas a media altura, pues las simulaciones se asemejan más a la realidad ya que los efectos secundarios tienen menor incidencia en una posición central (torbellinos de pasada, torbellino de herradura...).

sitúa a *45 grados* de la horizontal. Al fijarse en el modelo la dirección del viento según el sentido positivo del eje *X* (ver apartado 3.1.4.2.5), el eje longitudinal del velero definirá un ángulo de *45 grados* con la velocidad del viento.

El último reglaje que se mantiene invariable a lo largo de todo el estudio es la longitud de la botavara ($L_{botavara}$), parámetro que define la cuerda del perfil de la vela mayor. Se trata de un reglaje de gran interés, sin embargo, su estudio supone un aumento considerable del número de casos a evaluar, siendo inviable durante su realización en el proyecto. La longitud de la botavara queda fijada en *2.5 metros*.

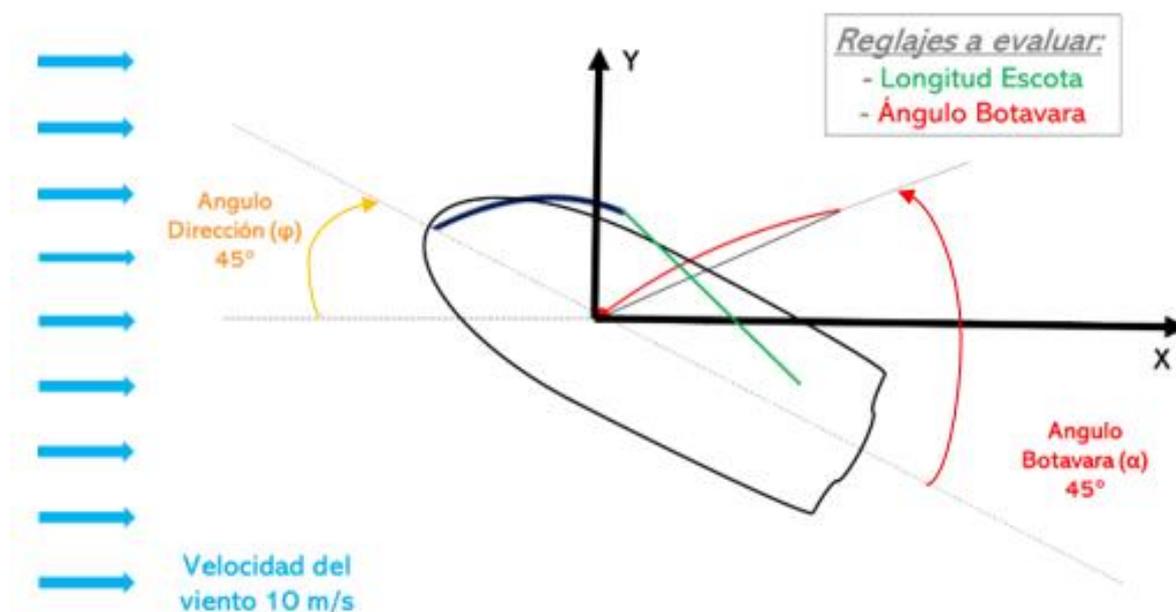


Ilustración 56 Esquema caso de navegación estudiado en el proyecto

Tras definir el caso de navegación concreto objeto del estudio, los reglajes evaluados a lo largo de las distintas simulaciones son:

- Longitud de la escota (L_{escota}): permitirá modificar la geometría del perfil del foque.
- Ángulo de la botavara (α): permitirá modificar el perfil de la vela mayor.

Las simulaciones consideran una posición estática del velero, i.e. el sistema de referencia es relativo a la embarcación, por lo que su velocidad es nula. Debido a esto los cálculos están basados en la velocidad del viento relativo respecto al sistema de referencia utilizado.

$$\vec{V}_{rel} = \vec{V}_{abs} - \vec{V}_{velero} \quad (5.1)$$

El estudio se centrará en encontrar los reglajes óptimos de las velas para el ángulo de dirección de *45 grados*. El análisis se centra en las fuerzas aerodinámicas resultantes en las velas. La fuerza resultante se analiza según dos componentes:

- **Fuerza de avance (F_{avance}):** Componente de la fuerza resultante sobre el eje longitudinal del velero que posibilita el avance de la embarcación según la dirección de avance.
- **Fuerza de deriva (F_{deriva}):** Componente de la fuerza resultante sobre la dirección normal al eje longitudinal del velero. Esta fuerza será compensada a efectos prácticos mediante las resultantes hidrodinámicas sobre el casco de la embarcación sirviéndose de la posición del timón para mantener la dirección deseada. La fuerza de deriva se opone al avance, pues esta componente se equilibra degradando la fuerza de avance total del velero.

$$\overrightarrow{F_{Total}} (N) = (F_X, F_Y) = \overrightarrow{F_{avance}} + \overrightarrow{F_{deriva}} \quad (5.2)$$

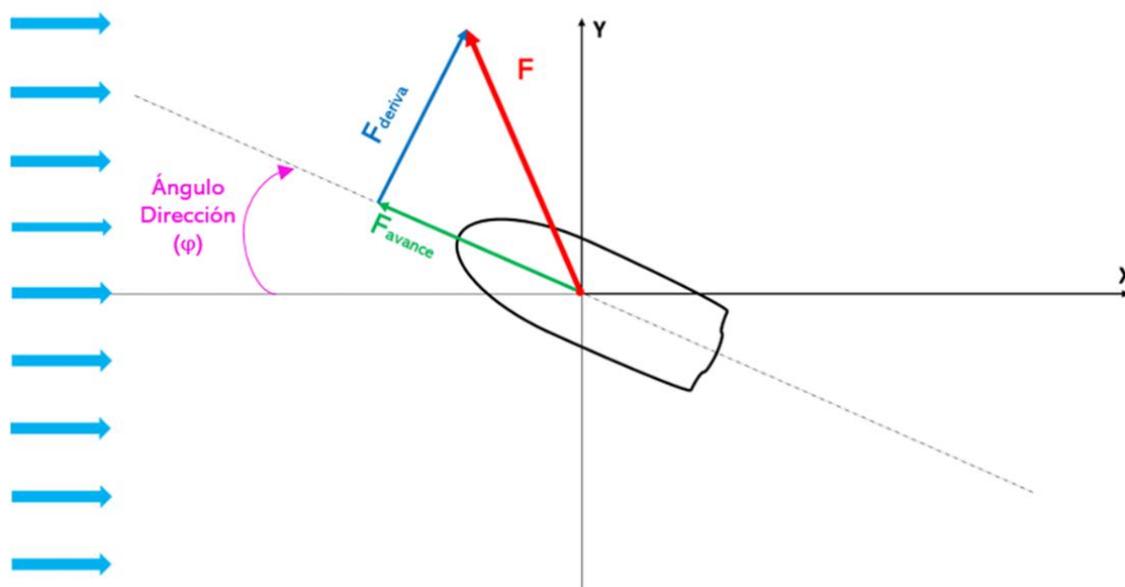


Ilustración 57 Componentes de la fuerza aerodinámica resultante sobre las velas del velero

La Ilustración 57 muestra la descomposición de la fuerza resultante en las dos componentes de interés mencionadas previamente según la dirección del velero. El módulo de resultados de ANSYS Fluent proporciona la fuerza calculada según el sistema de ejes absolutos del modelo (XY), precisando de su transformación según las siguientes expresiones:

$$F_{avance} (N) = -F_X \cdot \cos(\varphi) + F_Y \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (5.3)$$

$$F_{deriva} (N) = F_X \cdot \text{sen}(\varphi) + F_Y \cdot \cos(\varphi) \quad (5.4)$$

La posición óptima de las velas se define como aquella que induce mayores fuerzas de avance y menores fuerzas de deriva. El criterio utilizado para ajustar las velas consiste

entonces en maximizar la fuerza de avance consiguiendo el mayor rendimiento posible de la fuerza total (η_{Fuerza}).

$$\eta_{Fuerza} = \frac{F_{avance}}{F_{total}} = \frac{F_{avance}}{\sqrt{F_{avance}^2 + F_{deriva}^2}} \quad (5.5)$$

Las simulaciones realizadas se pueden clasificar en dos grandes grupos o series.

- **Simulación de la vela mayor**

El modelo inicial presentado en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es modificado de forma que solo se estudie la vela mayor del velero. El objetivo de esta serie de cálculos es encontrar el ángulo de la botavara óptimo (α) para las condiciones de navegación descritas.

- **Simulación del foque y de la mayor**

Posteriormente tras encontrar la posición óptima de la botavara cuando la vela mayor se simula independientemente, se pone en marcha el modelo completo de dos velas, con el propósito ahora de encontrar la longitud de la escota del foque (L_{escota}) óptima.

5.2 Estudio de la vela mayor

Debido a la dificultad de optimizar simultáneamente las dos velas con su respectivo grado de libertad asociado, se decide realizar una primera serie de cálculos con la vela mayor como objeto de estudio. La principal vela de un velero es la mayor, pues en ciertas ocasiones sólo se emplea sin la presencia del foque, por lo que los resultados aportarán nuevos datos y conclusiones acerca de esta vela.

Como se ha mencionado en el apartado 5.1, de los dos reglajes característicos de la vela mayor, sólo se estudiará el comportamiento según el ángulo de la botavara, sin efectuar ninguna variación en la longitud de la curda de la mayor o longitud de la botavara.

El rango del ángulo de la botavara estudiado parte desde una posición inicial a *0 grados* (vela mayor recogida sobre el eje del velero) hasta *90 grados*. Como el ángulo de dirección está fijado en *45 grados*, se producirá una simetría entre las geometrías de vela generadas entre *0-45 grados* con aquellas correspondientes a amplitudes de *45-90 grados*. A continuación, en la Ilustración 58 se presentan los resultados en términos de fuerzas resultantes de las simulaciones realizadas para distintos ángulos de botavara (α).

La fuerza de avance (F_{avance}) aumenta conforme el ángulo de la botavara se va abriendo. Esta tendencia se mantiene hasta que encuentra su máximo absoluto cuando el ángulo de la botavara es de *40 grados*. Por otra parte, la fuerza de deriva (F_{deriva}) disminuye progresivamente conforme la botavara se alinea con la dirección del viento aparente hasta encontrar su mínimo en *45 grados*.

ID	α (°)	F_x (N)	F_y (N)	F_{avance} (N)	F_{deriva} (N)	η_{fuerza}
1	0	157.85	167	6.47	229.70	0.03
2	5	135.37	171.55	25.58	217.03	0.12
3	10	116.18	177.7	43.50	207.80	0.20
4	15	97.29	181.92	59.84	197.43	0.29
5	20	78.28	183.28	74.25	184.95	0.37
6	25	77.55	182	73.86	183.53	0.37
7	30	39.79	175.2	95.75	152.02	0.53
8	35	27.35	184.3	110.98	149.66	0.60
9	40	7.13	204.63	139.65	149.74	0.68
10	42.5	4.1	185.37	128.18	133.98	0.69
11	45 (+)	2.79	145.36	100.81	104.76	0.69
11 bis	45 (-)	2.78	146.07	101.32	105.25	0.69
12	50	8.06	-211.82	-155.48	-144.08	-0.73
13	55	27.89	-185.03	-150.56	-111.11	-0.80
14	60	40.2	-174.91	-152.11	-95.25	-0.85
15	65	56.89	-176.52	-165.05	-84.59	-0.89
16	70	77.9	-184.13	-185.28	-75.12	-0.93
17	75	97.9	-184.05	-199.37	-60.92	-0.96
18	80	115.32	-177.36	-206.96	-43.87	-0.98
19	85	133.31	-169.74	-214.29	-25.76	-0.99
20	90	152.95	-162.18	-222.83	-6.53	-1.00

Ilustración 58 Recopilatorio de fuerzas en función del ángulo de la botavara (α) para los cálculos con una vela

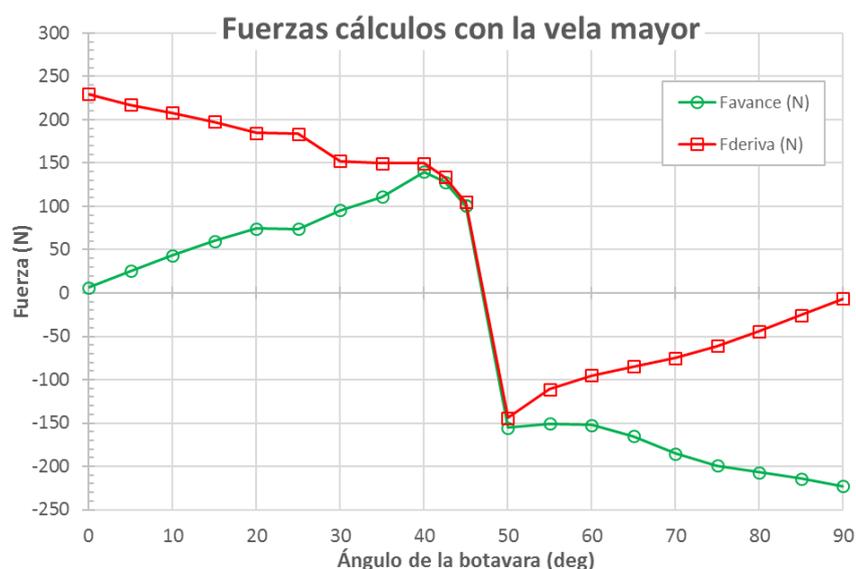


Ilustración 59 Evolución de la fuerza de avance y de la fuerza de deriva para distintos ángulos de apertura de la botavara

En la Ilustración 59 se muestra la evolución de las fuerzas de la vela mayor. A partir de 45 grados de apertura la fuerza de avance es negativa, pues las diferencias de presión entre los dos contornos de la vela pasan a ser negativos. Las mencionadas posiciones de la vela mayor

no son por tanto configuraciones interesantes o deseables, sin embargo, su simulación supone un indicio para la validación del modelo de cálculo *CFD* desarrollado.

En cuanto al rendimiento de la fuerza total (η_{fuerza}), el máximo se encuentra a *45 grados* (ver Ilustración 60). Adicionalmente los cálculos a *40 y 42.5 grados* presentan también altos rendimientos, lo que indica que una parte importante de la fuerza resultante generada por la vela se utiliza para avanzar según la dirección de navegación.

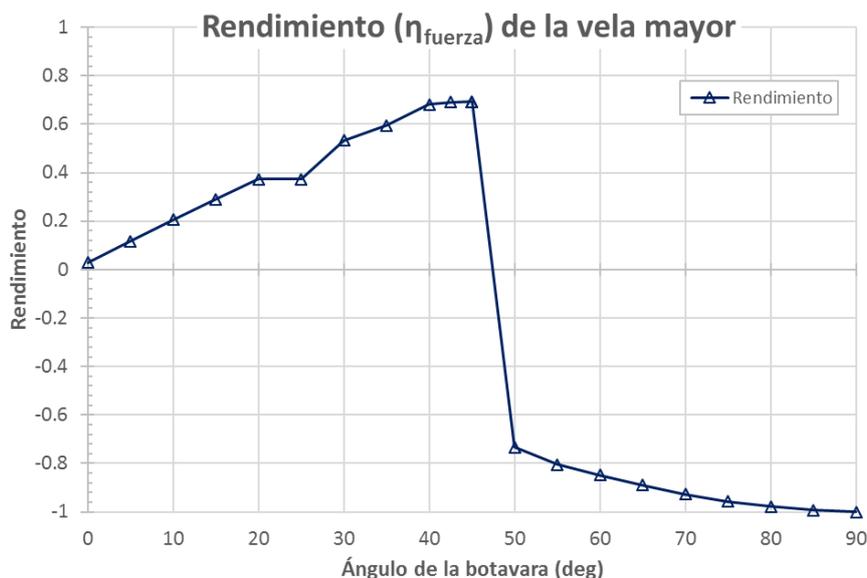


Ilustración 60 Relación (F_{avance}/F_{total}) para distintas posiciones de la botavara

Por otra parte, cuando la botavara se encuentra alineada con el viento (ángulo de la botavara de 45 grados) existen dos posibles soluciones simétricas:

- **Vela con diferencia de presión intradós-extradós positivo (ID simulación 11 - 45 (+)):** El contorno intradós corresponderá al lado cóncavo, mientras que el contorno extradós será el lado convexo del perfil.
- **Vela con diferencia de presión intradós-extradós negativo (ID simulación 11bis - 45(-)):** El contorno intradós se corresponde al lado convexo, mientras que el contorno extradós es el lado cóncavo del perfil.

El modelo desarrollado llega a cada una de estas dos posibles soluciones en función de los archivos de presión utilizados para inicializar el cálculo (ver apartado 4.1). La validez de los dos cálculos es óptima, pues los perfiles ΔP a ambos lados de la vela convergen tras cinco iteraciones como se muestra en la Ilustración 61. La existencia de dos soluciones parciales en función del punto de partida del cálculo hace indicar que se trata de una situación desfavorable, donde considerando la naturaleza transitoria del viento lo más probable es que la vela en esta configuración entre en una zona de inestabilidad entre las dos posiciones de equilibrio. Con el fin de verificar esta hipótesis es interesante estudiar el comportamiento inestable de la vela mediante un modelo de cálculo *CFD* en transitorio.

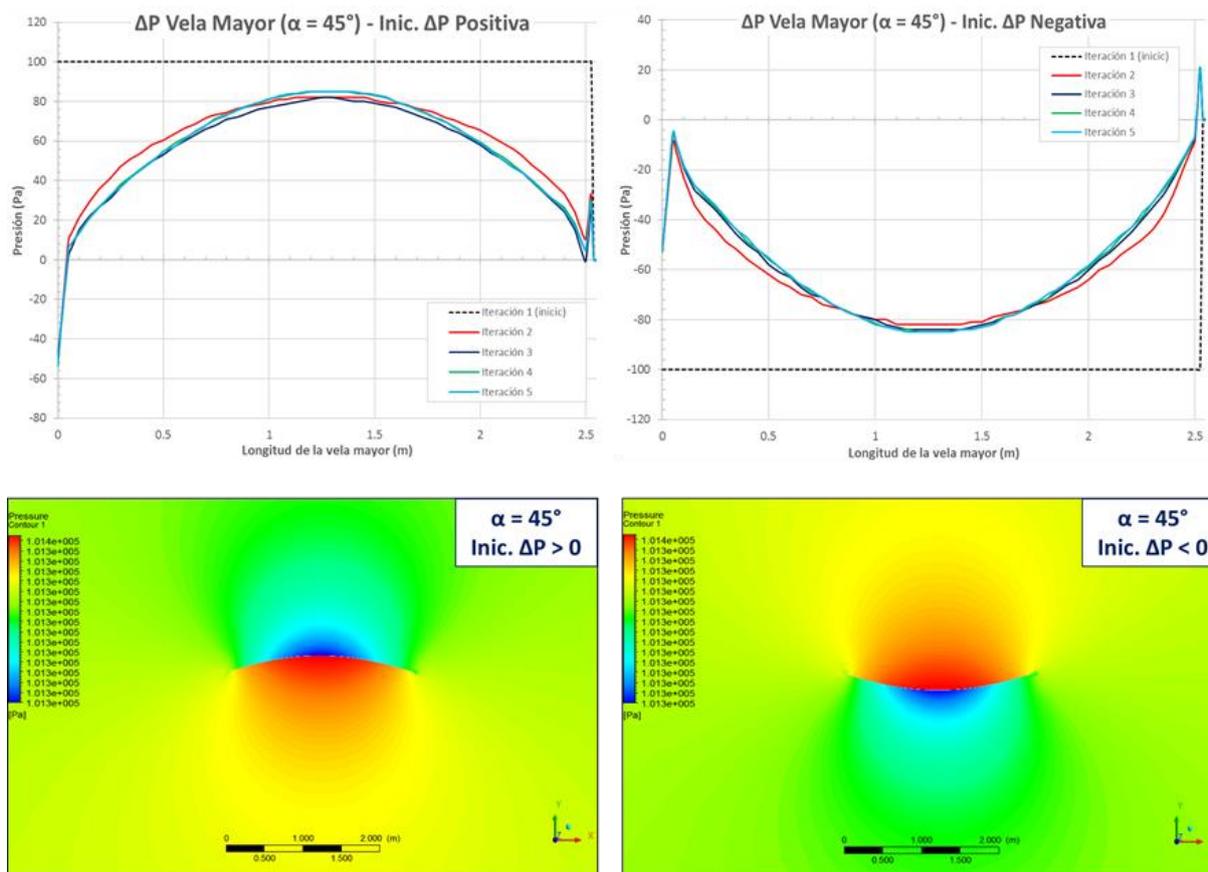


Ilustración 61 Perfiles y contornos de presión estática para las dos perfiles-solución encontrados con una apertura de botavara (α) de 45 grados.

Se deduce que las posiciones de la vela mayor interesantes se corresponden al rango del ángulo de la botavara (φ) comprendido entre 0 y 42.5 grados. El óptimo encontrado en esta serie de cálculos se sitúa para una apertura de botavara de **40 grados**, justificándose su elección en la maximización de la fuerza de avance (F_{avance}).

A continuación, se presentan en las ilustraciones Ilustración 62 y Ilustración 63 los principales resultados relativos a las simulaciones de la vela mayor a 40 grados de apertura.

Los resultados de los perfiles de ΔP a lo largo del perfil de la vela convergen hacia una misma solución tras completarse dos iteraciones completas (el perfil de presión "Iteración 3" se aproxima tanto en tendencia como en valores a la solución final). En cuanto a los diferentes perfiles iterados en la cadena de cálculo, no se aprecian diferencias remarcables a simple vista, excepto en el caso del perfil de inicialización (línea discontinua). La velocidad en la convergencia es común a todos los cálculos de la presente serie sobre la vela mayor, a excepción de aquellos casos en los que el mallado presentaba deficiencias en la ortogonalidad de sus mallas.

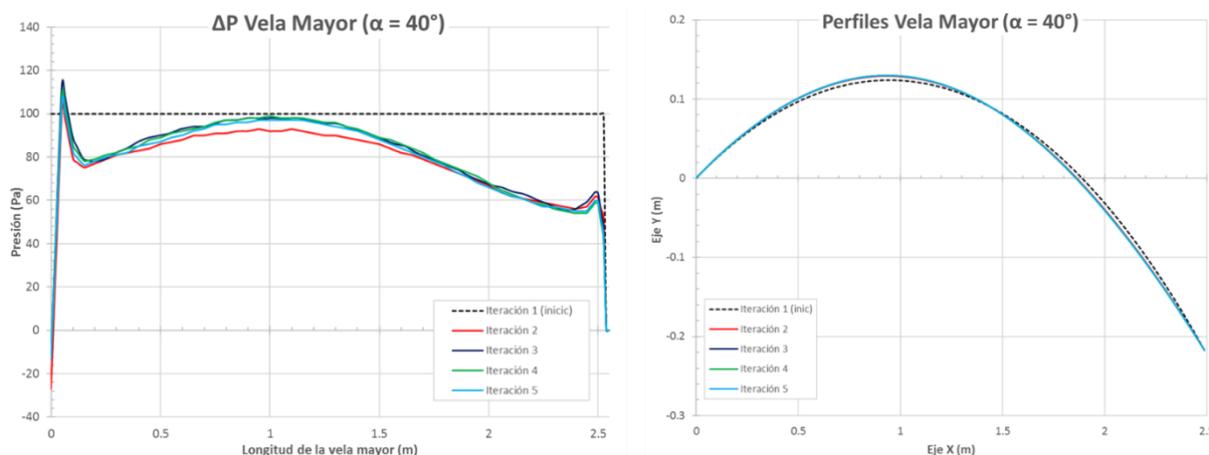


Ilustración 62 Detalles de las iteraciones para el caso de cálculo con una apertura de la botavara de 40 grados. a) Perfil de diferencia de presión b) Perfiles generados

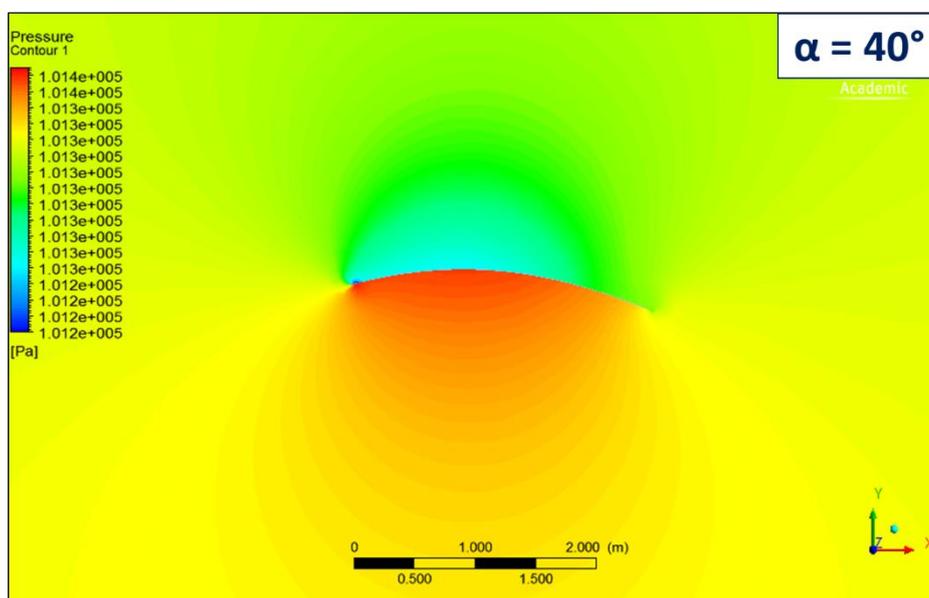


Ilustración 63 Contornos de presión estática para el caso de cálculo con apertura de la botavara de 40 grados

➤ Estudio de las fuerzas generadas para el caso seleccionado ($\alpha=40^\circ$)

Las fuerzas resultantes sobre la vela tienen dos naturalezas como se vio en el apartado 2, fuerzas de presión y fuerzas viscosas. El contorno de la vela mayor en el modelo ANSYS se encuentra discretizado en cuatro partes (borde de ataque, borde de fuga, extradós e intradós). Se procede a estudiar descomponer la fuerza resultante en cada una de las partes del contorno de la vela y así mismo se evalúa la naturaleza de las fuerzas (ver Ilustración 64). Las principales observaciones y conclusiones son las siguientes:

- El orden de magnitud de las fuerzas de presión es muy superior al de las fuerzas viscosas.
- El extremo correspondiente al borde de ataque produce una fuerza de avance negativa, oponiéndose al desplazamiento del velero. El mástil se encontraría aguas

arriba de la vela, por lo que resulta interesante evaluar la influencia de este en las fuerzas desarrolladas.

- El extremo correspondiente al borde de fuga produce en términos de fuerza de presión en el sentido del avance, una fuerza de 466.88 N por metro de profundidad. Teniendo un impacto muy significativo en el global de la fuerza de avance de la vela mayor.
- El conjunto de las fuerzas sobre los contornos extradós e intradós de la vela produce una fuerza de avance negativa. Se extrae que la fuerza de avance es generada mayoritariamente en los extremos de las velas.

Contorno	FUERZAS DE PRESIÓN		FUERZAS DE VISCOSIDAD		FUERZAS TOTALES	
	F _{avance} (N)	F _{deriva} (N)	F _{avance} (N)	F _{deriva} (N)	F _{avance} (N)	F _{deriva} (N)
Borde Ataque	-252.56	439.19	$3.07 \cdot 10^{-3}$	$1.77 \cdot 10^{-3}$	-252.56	439.19
Borde Fuga	466.88	-196.12	$1.84 \cdot 10^{-5}$	$4.38 \cdot 10^{-5}$	466.88	-195.89
Extradós	-162675.52	-193878	$-2.25 \cdot 10^{-1}$	$2.35 \cdot 10^{-1}$	-162675.75	-193877.83
Intradós	162601.29	193784.26	$-2.15 \cdot 10^{-1}$	$1.68 \cdot 10^{-1}$	162601.08	193784.66
Sumatorio	140.09	149.33	$-4.37 \cdot 10^{-1}$	$4.04 \cdot 10^{-1}$	139.65	150.14

Ilustración 64 Resumen de fuerzas sobre la vela mayor para el caso de cálculo con ángulo de botavara (ϕ) igual a 40 grados

5.3 Estudio del reglaje del foque en el modelo de dos velas

Una vez fijados los reglajes a utilizar para la vela mayor, se procede a implementar el modelo completo con dos velas y buscar el reglaje óptimo del foque. Como se ha mencionado previamente, el reglaje del foque viene definido por la longitud de la escota (L_{escota}).

5.3.1 Rango de longitudes de escota estudiado

En primer lugar, se presentan las longitudes de escota límites, i.e. los extremos del rango estudiado. La menor longitud de la escota es aquella que transmite a la vela la mayor tensión posible, siendo el caso límite el perfil del foque una recta. Se calcula la longitud de la escota mínima a partir de los parámetros geométricos del velero, como la distancia entre la proa del velero (punto inicial del foque) y la polea ($D_{proa-polea}$) y la longitud del perfil del foque (L_{foque}):

$$D_{proa-polea} = \sqrt{(X_{proa} - X_{polea})^2 + (Y_{proa} - Y_{polea})^2} = 6.50 \text{ m} \quad (5.6)$$

$$L_{escota_{min}} = D_{proa-polea} - L_{foque} = 4,50 \text{ m} \quad (5.7)$$

La longitud de escota mínima a simular es *4.50 metros*, como este reglaje no tiene interés desde el punto de vista de navegación e induciría tensiones muy elevadas en la vela, se decide comenzar el rango de escotas simuladas a partir de **4.55 metros**.

Por otra parte, los cálculos con distintas longitudes de escota se extienden hasta que el foque alcanza un estado de inestabilidad. La inestabilidad de la vela se evidencia en el desarrollo de las iteraciones de cálculo llevadas a cabo. La Ilustración 65 muestra los perfiles del foque, donde se observa que la geometría de la vela no converge, pues cada posición adoptada genera unas presiones estáticas no compatibles con ella que deforman la vela hacia otra posición de equilibrio.

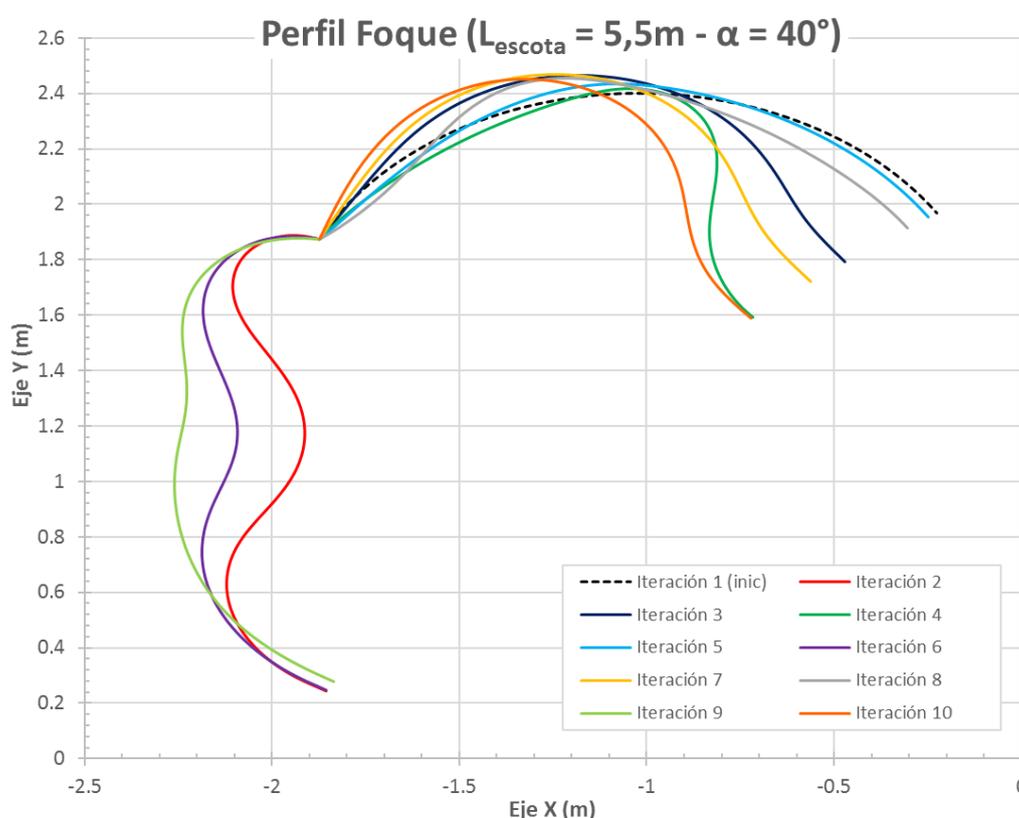


Ilustración 65 Perfiles del foque simulados en las distintas iteraciones de cálculo para una longitud de escota de 5.50 metros

En base a todos estos resultados, el rango de interés de la variable L_{escota} que se estudia es **4.55 – 5.40 metros**.

5.3.2 Fuerzas de navegación

En este apartado se presentan los resultados relativos a las fuerzas ejercidas sobre las dos velas para las diferentes longitudes de escota simuladas. El criterio utilizado para la elección de los parámetros de trimado óptimos es la maximización de la fuerza de avance global del velero de forma equivalente al estudio de la vela mayor del apartado anterior.

L_{escota} (m)	FUERZAS FOQUE			FUERZAS MAYOR			FUERZAS VELERO		
	F_{avance} (N)	F_{deriva} (N)	η	F_{avance} (N)	F_{deriva} (N)	η	F_{avance} (N)	F_{deriva} (N)	η
4.55	35.81	173.20	0.20	16.41	29.65	0.48	52.22	202.85	0.25
4.6	46.39	163.35	0.27	12.72	28.01	0.41	59.11	191.36	0.30
4.7	70.71	177.78	0.37	53.37	76.54	0.57	124.05	254.29	0.44
4.8	83.14	167.74	0.44	71.48	97.81	0.59	154.62	265.56	0.50
4.9	99.09	166.16	0.51	95.44	121.95	0.62	194.54	288.10	0.56
5.0	117.05	163.12	0.58	103.66	128.55	0.63	220.72	291.66	0.60
5.1	137.43	171.33	0.63	98.83	120.90	0.63	236.27	292.23	0.63
5.2	143.83	169.20	0.65	102.04	123.93	0.64	245.86	293.12	0.64
5.3	97.33	125.43	0.61	116.18	133.78	0.66	213.52	259.21	0.64
5.4	28.74	61.89	0.42	138.77	150.39	0.68	167.10	213.17	0.62

Ilustración 66 Recopilatorio de fuerzas en función de la longitud de la escota (L_{escota}) para los cálculos con dos velas

En la Ilustración 66 se muestran los resultados de las fuerzas resultantes sobre cada vela de forma individual, así como la fuerza total aerodinámica del velero. Las fuerzas están medidas para una profundidad "Z" de las velas de 1 metro.

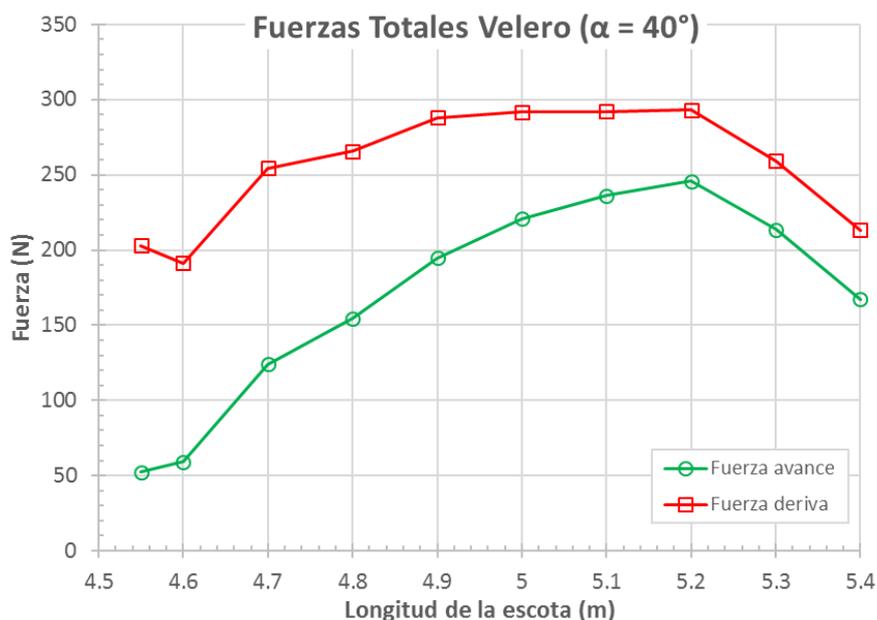


Ilustración 67 Evolución de la fuerza de avance y de la fuerza de deriva para distintas longitudes de escota (L_{escota}) con una apertura de botavara constante de 40 grados

El análisis de las fuerzas globales sobre las dos velas (ver Ilustración 67) pone de manifiesto la generación de fuerzas de deriva mayores a las de avance en todos los casos, hecho

observado en el estudio de la vela mayor. De igual modo, conforme se maximiza la fuerza de avance, la fuerza de deriva se aproxima a esta última. La máxima fuerza de avance se obtiene para una longitud de escota igual a 5.2 metros. Superada la longitud de escota óptima, la degradación de la fuerza de avance es considerable.

Las simulaciones con dos velas permiten analizar la aportación individual de cada vela en términos de fuerza y rendimiento. Es de especial interés comparar el comportamiento de la vela mayor en combinación con el foque con respecto a los resultados cuando esta se simula de manera individual.

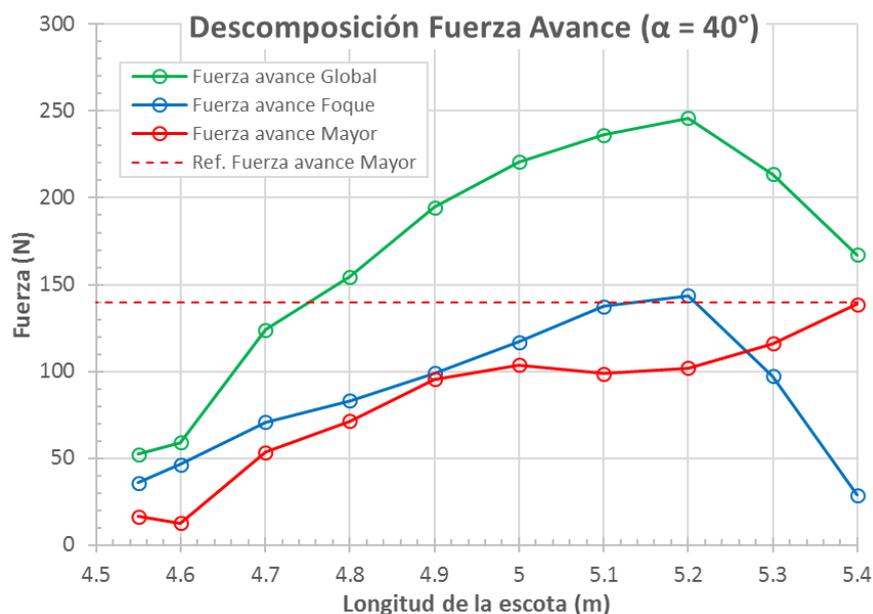


Ilustración 68 Evolución de la fuerza de avance total y de cada una de las velas para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con una apertura de botavara constante de 40 grados

En la Ilustración 68 se muestra la aportación en cuanto a fuerza de avance de cada una de las dos velas. Se extraen las siguientes observaciones:

- La longitud de escota óptima en términos globales (5.2 metros) se corresponde igualmente a la máxima fuerza de avance del foque.
- El foque situado a aguas arriba de la vela mayor degrada la fuerza de avance generada por la vela mayor. Esa influencia negativa disminuye conforme las longitudes de escota aumentan, i.e. se reduce la interacción entre ambas velas, incidiendo menos "aire sucio" del foque sobre la vela mayor.
- La fuerza de avance generada por el foque es mayor a la generada por la mayor, aun contando con una longitud de vela inferior (2 metros del foque contra 2.5 metros de la vela mayor).
- Las prestaciones del foque para longitudes de escota superiores a 5.2 metros decrecen de manera drástica, fenómeno que tiene su continuación en las prestaciones globales, aunque limitado en un cierto grado gracias al incremento de la fuerza de avance de la vela mayor.

De manera equivalente, se analizan las aportaciones de cada vela en cuanto a fuerza de deriva (ver Ilustración 69).

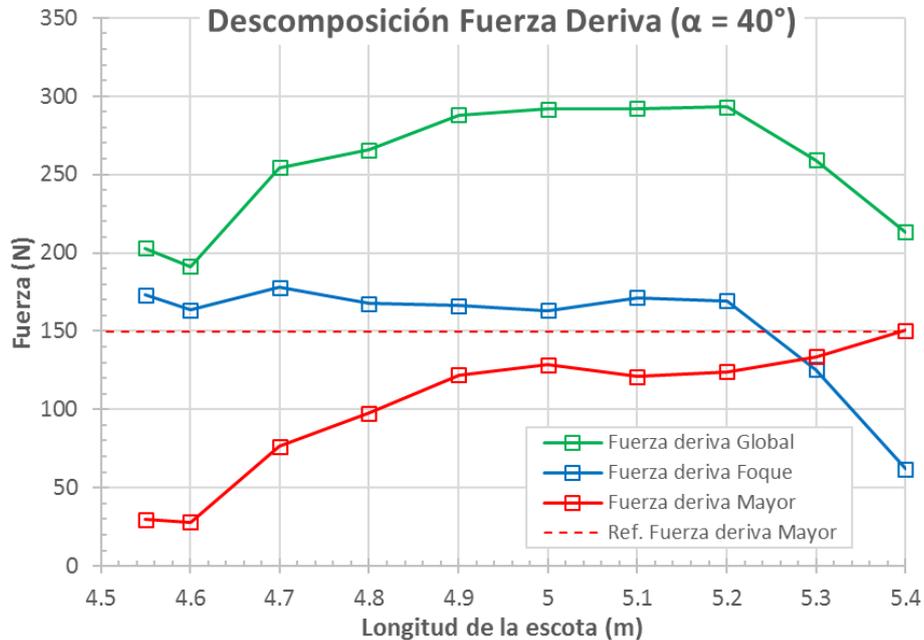


Ilustración 69 Evolución de la fuerza de deriva total y de cada una de las velas para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con una apertura de botavara constante de 40 grados

Las conclusiones extraídas sobre la fuerza de deriva del modelo con dos velas y la influencia de la longitud de la escota son las siguientes:

- Las longitudes de escota que minimizan la fuerza de deriva total se encuentran en los extremos del rango estudiado, siendo estas posiciones del foque poco interesantes.
- La fuerza de deriva total se mantiene sin grandes variaciones para longitudes de escota comprendidas entre 4.9 y 5.2 metros.
- El foque soporta una fuerza de deriva relativamente constante para las distintas geometrías estudiadas, sin embargo, a partir de 5.2 metros de longitud de escota se produce una caída brusca (efecto equivalente al observado en la fuerza de avance).
- Las posiciones del foque más ceñidas (longitudes de escota pequeñas) producen una disminución en la fuerza de deriva generada por la mayor, coincidente a lo observado en las fuerzas de avance.

Se ha puesto en evidencia la importancia de reglar el perfil del foque a la hora de maximizar la fuerza de avance, siendo superior la fuerza generada en el foque que en la vela mayor. El foque produce una disminución de las fuerzas generadas en la vela mayor, tanto de avance como de deriva. Para poder determinar la conveniencia de esta disminución de fuerza en la mayor, se analizan los rendimientos de las velas (η).

La Ilustración 70 pone en evidencia la “eficiencia” de la fuerza generada por las velas, entendiéndose como una fuerza eficiente aquella que sirve para hacer avanzar al velero según la dirección de navegación.

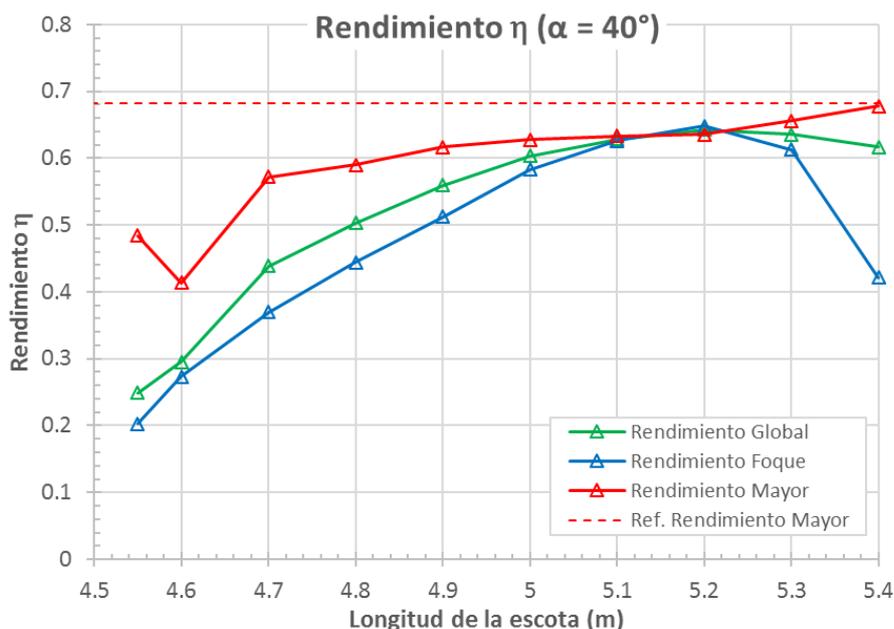


Ilustración 70 Evolución del rendimiento global y de cada una de las velas para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con una apertura de botavara constante de 40 grados

Las observaciones realizadas son las siguientes:

- La vela mayor es más eficiente que el foque de forma general. Para las longitudes de escota 5.1 y 5.2 metros ambos rendimientos son parejos.
- La simulación del foque induce una pérdida de rendimiento en la vela mayor, i.e. la degradación de la fuerza de avance generada por la mayor es superior a la pérdida de fuerza de deriva.

Se analiza el ángulo de incidencia del viento respecto de las velas. El ángulo de incidencia viene definido por la dirección del viento y la cuerda del perfil, como a efectos prácticos la cuerda del perfil del foque puede resultar difícil de identificar, se analizará la desviación o ángulo de entrada ($\theta_{0,foque}$) del borde de ataque de la vela respecto a la dirección del flujo aguas arriba.

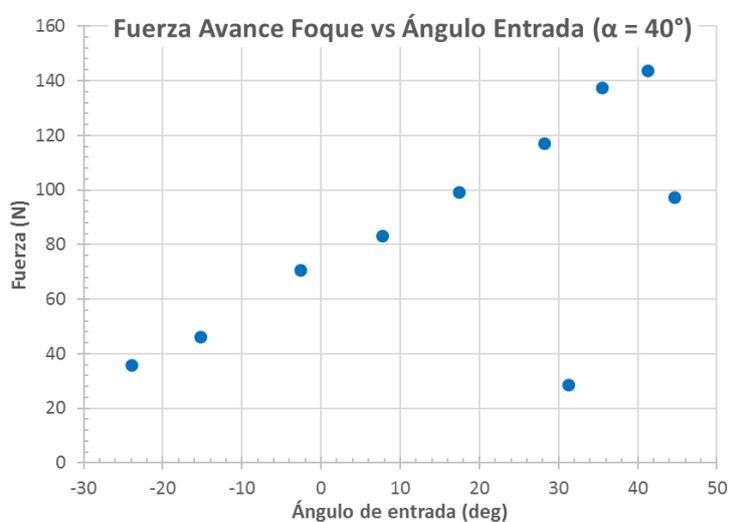


Ilustración 71 Fuerza de avance del foque en función del ángulo de entrada del perfil $\theta_{0,foque}$ para la serie de cálculos realizada a $\alpha=40^\circ$

En la Ilustración 71 se muestra la fuerza de avance generada en el foque en función del ángulo de entrada en el borde de ataque de los diferentes perfiles foque simulados (longitudes de escota variables). El ángulo de entrada ($\theta_{0,foque}$) de **31,3 grados**, se corresponden al perfil del foque con la máxima longitud de escota estudiada (**5,4 metros**). En este caso existe un punto de inflexión al comienzo del perfil debido a diferencias de presión intradós-extradós negativas, explicando la baja fuerza de avance generada.

El ángulo de entrada respecto a la dirección del viento óptimo es de **41.3 grados**.

Alternativamente, en la vela mayor las variaciones en el ángulo de entrada del perfil ($\theta_{0,mayor}$) son reducidas, ya que se deben a la modificación de la geometría del foque aguas arriba y, por consiguiente, la modificación del flujo incidente. En la Ilustración 72 se representa la fuerza de avance para los distintos ángulos de entrada de la mayor.

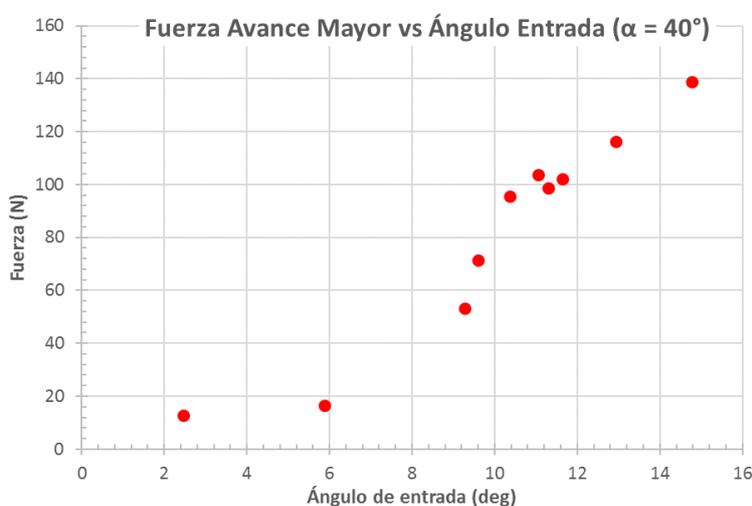


Ilustración 72 Fuerza de avance de la vela mayor en función del ángulo de entrada del perfil $\theta_{0,mayor}$ para la serie de cálculos realizada a $\alpha=40^\circ$

La mayor fuerza de avance se obtiene con $\theta_{0,mayor}$ igual a **14.7 grados**, correspondiente al caso de cálculo con la máxima longitud de escota (**5.4 metros**). Se observa como las menores fuerzas de avance se corresponden a ángulos de entrada reducidos provocados por posiciones del foque muy ceñidas que dirigen en flujo hacia el extradós de la vela mayor reduciendo la curvatura del perfil en las zonas próximas al borde de ataque.

5.4 Estudio del reglaje de la vela mayor en el modelo de dos velas

Tras optimizar el reglaje del foque del modelo de dos velas, el siguiente paso es determinar si la posición de la vela mayor (resultado de la optimización del modelo con una única vela) utilizada es la más eficaz también bajo la presencia del foque. Con este fin se lanza una nueva serie de cálculos, centrándose en la evaluación del ángulo de la botavara (α) en el modelo completo de dos velas.

El reglaje del foque se mantiene invariable a lo largo de la serie de cálculos, fijándose una longitud de escota (L_{escota}) de **5.2 metros** (longitud de escota que maximiza las fuerzas en el foque). Por otra parte, el rango evaluado de apertura de la botavara (α) es reducido, pues se

prioriza un ajuste “fino” de la vela mayor teniendo como punto de partida la posición óptima de la vela mayor en solitario ($\alpha=40^\circ$).

5.4.1 Fuerzas de navegación

En este apartado se presentará, de manera equivalente a lo realizado en las anteriores series de cálculo, los resultados de las fuerzas aerodinámicas generadas en las velas respecto a la dirección de navegación. En la Ilustración 73 se muestran las fuerzas resultantes de las simulaciones.

$\alpha_{\text{botavara}} (^\circ)$	FUERZAS FOQUE			FUERZAS MAYOR			FUERZAS VELERO		
	$F_{\text{avance}} (N)$	$F_{\text{deriva}} (N)$	η	$F_{\text{avance}} (N)$	$F_{\text{deriva}} (N)$	η	$F_{\text{avance}} (N)$	$F_{\text{deriva}} (N)$	η
35	148.57	174.13	0.64	123.84	159.68	0.61	272.41	333.81	0.63
37.5	145.86	172.00	0.64	116.94	144.83	0.62	262.81	316.84	0.63
40	143.82	169.19	0.64	102.03	123.92	0.63	245.86	293.12	0.64
42.5	118.20	147.25	0.62	81.32	96.35	0.64	199.53	243.61	0.63
45	98.83	127.65	0.61	21.02	29.98	0.57	119.84	157.63	0.60

Ilustración 73 Recopilatorio de fuerzas en función del ángulo de la botavara (α) para una longitud de escota (L_{ESCOTA}) de 5.2 metros

Se observa que conforme la vela mayor se ciñe respecto a la posición original (40 grados) las fuerzas resultantes sobre cada una de las dos velas aumentan. Ceñir la vela mayor significa reducir la interacción entre ambos perfiles, siendo este un efecto positivo, equivalente a lo observado al aumentar la longitud de escota en los cálculos del apartado anterior.

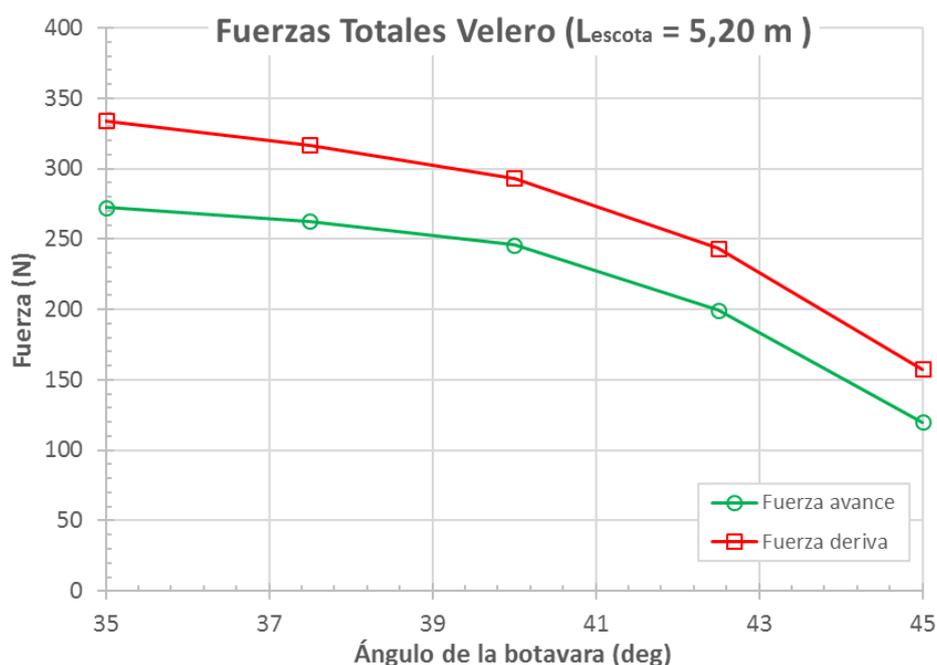


Ilustración 74 Fuerzas de avance y de deriva totales para distintos ángulos de apertura de la botavara (α) fijando la longitud de la escota (L_{ESCOTA}) en 5,20 metros

En la Ilustración 74 se muestra la tendencia positiva del ceñir la vela mayor. Se confirman las apreciaciones realizadas en el precedente estudio acerca de la naturaleza de las fuerzas

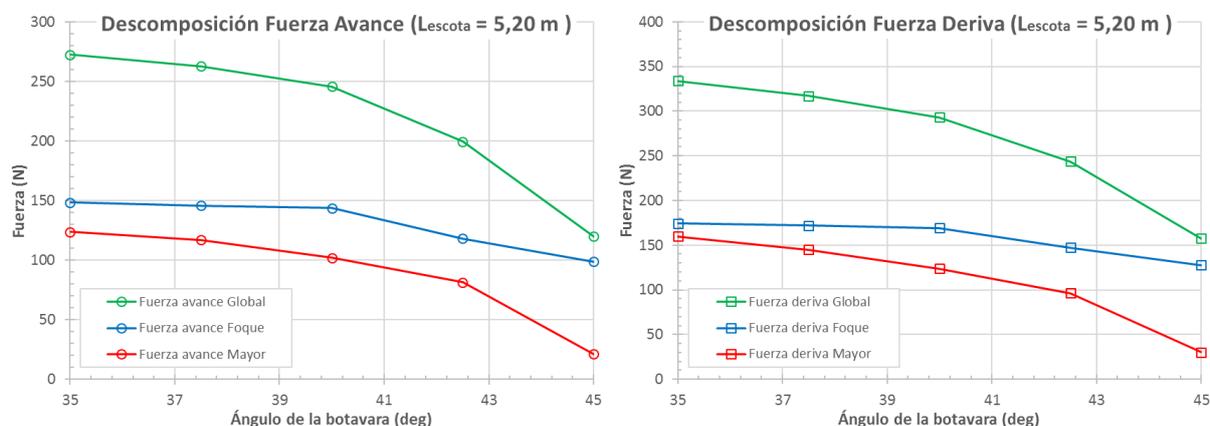


Ilustración 75 Descomposición de la fuerza de avance (izquierda) y de la fuerza de deriva (derecha) en función de diferentes ángulos de botavara (α) para una longitud de escota (L_{ESCOTA}) fijada a 5.2 metros

aerodinámicas sobre las velas, pues las fuerzas de deriva son siempre superiores a las de avance. Este fenómeno se ve acrecentado al ceñir la vela mayor.

Se concluye que, tras incorporar el foque a la simulación, ceñir la vela mayor ligeramente reporta un aumento bastante importante en la fuerza de avance del velero. Las fuerzas se incrementan mayoritariamente sobre la vela mayor, mientras que la fuerza en el foque se mantiene relativamente constante.

La mejora en las fuerzas generadas a priori parece una buena razón para determinar la pertinencia de ceñir la vela mayor *5 grados* (hasta *35 grados*). Sin embargo, el inherente aumento de las fuerzas de deriva puede provocar la inestabilidad y posterior vuelque del velero. Una vez más se hace indispensable estudiar desde el punto de vista hidrodinámico las fuerzas totales que afectan al velero, a fin de dar respuesta a la optimización de velas.

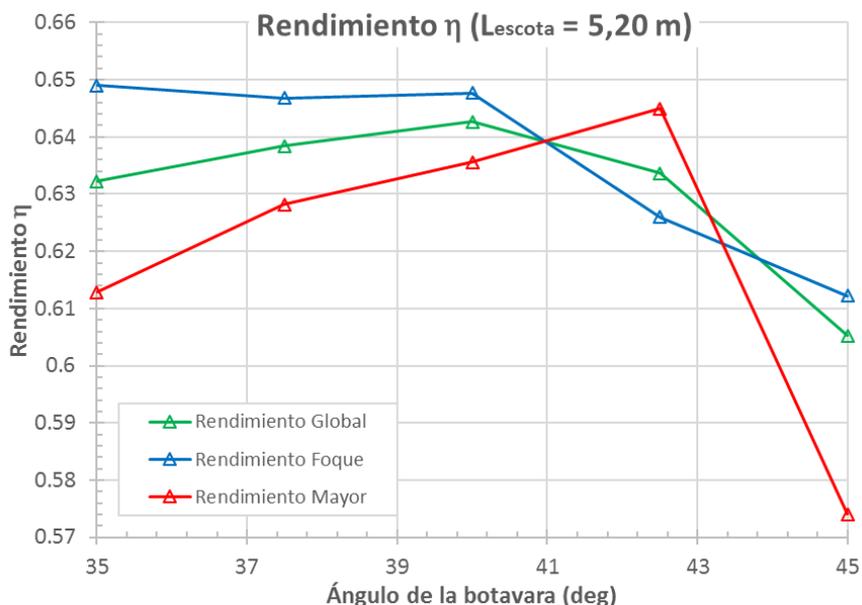


Ilustración 76 Evolución del rendimiento global y de cada una de las velas para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota (L_{ESCOTA}) fija de 5.2 metros

En la Ilustración 75 se evidencia la poca sensibilidad de las fuerzas del foque cuando la vela mayor se ciñe, sin embargo, estas son degradadas cuando el ángulo de la botavara crece provocando una mayor interacción entre los flujos que atraviesan ambas velas.

La pérdida de rendimiento aerodinámico (ver Ilustración 76) al filar la vela mayor es muy importante, lo que indica que, aparte de generar menores fuerzas aerodinámicas, estas son de peor calidad para hacer avanzar el velero. Este fenómeno se evidencia, aunque en menor grado, al ceñir la vela mayor. El óptimo global se sitúa en el ángulo de botavara (α) de partida, i.e. a *40 grados*.

La evaluación del reglaje del ángulo de la botavara en el modelo de dos velas muestra la dificultad de determinar un ángulo de apertura de la mayor óptimo que maximice las fuerzas aerodinámicas totales. Contrariamente a lo observado en la evaluación de diferentes longitudes de escota, la apertura de la botavara que maximiza las fuerzas aerodinámicas totales de avance no optimiza de igual manera el rendimiento de las fuerzas (η).

5.4.2 Conclusiones del estudio de dos velas

Después de analizar detalladamente las fuerzas aerodinámicas generadas en las velas desde distintos puntos de vista, se opta por priorizar el rendimiento de las velas (fuerza de avance vs. fuerza de deriva). Los reglajes óptimos para el caso de navegación objeto del estudio son:

- **Ángulo de la botavara (α) = 40°.**
- **Longitud de la escota (L_{escota}) = 5.2 m.**

Las diversas simulaciones realizadas, ponen en evidencia la mayor capacidad de la vela mayor respecto del foque para generar fuerzas más útiles desde el punto de vista motriz (mayor rendimiento). El foque por su parte induce fuerzas mayores en todos los sentidos, aunque generalmente menos útiles que las de la mayor. A su vez se observa que la utilización del foque degrada las fuerzas en la mayor.

El interés del foque reside, por tanto, en la fuerza por unidad de longitud, ya que las fuerzas generadas (de avance y de deriva) son mayores a las de la mayor, siendo su longitud menor a la de esta última.

La realización de los cálculos no ha permitido evidenciar ningún beneficio debido de la interacción de ambas velas. La continuación en el estudio de la interacción entre ambas velas se convierte en una dirección de desarrollo interesante a fin de poder validar estas observaciones.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS POSTERIORES

6.1 Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones globales del proyecto. Se ha desarrollado una herramienta de cálculo CFD de las dos velas principales del velero. Inicialmente se parte de un modelo de simulación de una vela simétrica que precisaba de Excel, Catia y ANSYS, y se obtiene una herramienta de cálculo de dos velas (foque y vela mayor) utilizando un programa en C++ desarrollado y del entorno de ANSYS. La naturaleza iterativa de la herramienta responde a la necesidad de generar perfiles de vela a partir de resultados CFD de presión. Las principales características son las siguientes:

- Posibilidad de simular perfiles de vela realistas gracias a la realimentación del modelo de generación de la geometría con los perfiles de presión extraídos de los cálculos CFD en ANSYS Fluent.
- Parametrización total en la generación de la geometría, lo que posibilita el estudio de cualquier caso para una geometría definida (reglajes de las velas, rumbo de navegación...) y un flujo determinado (velocidad del viento, nivel de turbulencia, temperatura...).
- Implementación del modelo de generación de perfiles de vela gracias al desarrollo de un programa ejecutable en C++, lo que ha implicado una mejora considerable en la integración global del modelo gracias a la gestión de ficheros (lectura de ficheros de resultados Fluent, generación de los ficheros de coordenadas de contornos de velas y ficheros recopilatorios de la ejecución del programa).
- Geometría adaptativa a el caso de cálculo, i.e. la dirección del flujo simulado es invariable (entrada a la izquierda y salida a la derecha según la dirección horizontal), es la geometría de las velas la que se modifica según la dirección de navegación definida.
- Automatización de la gran mayoría de operaciones realizadas en el entorno de ANSYS Fluent para cada iteración de cálculo, gracias a su incorporación en un *Script* ejecutado por el usuario.
- Desarrollo de un modelo de mallado robusto y suficientemente preciso como para obtener resultados de una calidad aceptable. Se ha definido la parametrización del modelo capaz de generar automáticamente la malla para cualquier geometría. El mallado no ha presentado ninguna deficiencia durante los cálculos realizados.
- Proceso de cálculo CFD en dos fases. Las simulaciones son calculadas inicialmente utilizando un modelo de turbulencia simplista de viscosidad nula, a partir de la solución obtenida se pone en marcha una segunda fase de cálculo con el modelo de turbulencia, en este caso "*Spalart-Allamaras*". El interés reside en la limitación de potenciales problemas de convergencia de modelos de turbulencia complejos, ya que al comenzar el cálculo desde una solución aproximada se mejora considerablemente la convergencia de los mismo.

- Gracias al uso de la herramienta desarrollada, ha sido posible obtener resultados para distintos reglajes de velas, así como extraer información acerca de los parámetros de trimado más eficientes en términos de fuerza aerodinámica.

Diversos casos de cálculo han sido simulados utilizando la herramienta desarrollada. De su funcionamiento se destacan distintos aspectos:

- La resolución numérica de las simulaciones es de gran calidad para la gran mayoría de los cálculos, obteniendo residuales con órdenes de magnitud inferiores a $1 \cdot 10^{-3}$.
- Los casos de cálculo aislados que han presentado problemas en su convergencia presentaban en su mayoría una baja ortogonalidad en la malla. Se ha solucionado mediante la mejora de automática de calidad del mallado, identificándose las mallas problemáticas, y modificando su morfología.
- La convergencia global de la herramienta de cálculo, entendiéndose como la convergencia hacia una determinada geometría de perfiles, es rápida y satisfactoria. De media se precisan cuatro bucles completos de cálculo para que los perfiles de presión calculados se mantengan estables respecto a la iteración previa.
- Se han simulado situaciones inestables de las velas bajo determinadas condiciones, haciéndose evidente en la no convergencia de la cadena de cálculo. En estos casos, aunque los cálculos son estacionarios, los diferentes perfiles de vela obtenidos para cada iteración permiten evidenciar las diferentes posiciones de las velas en los sucesivos instantes temporales, dando a los resultados un carácter *pseudo-transitorio*.
- Se constata la importancia de la inicialización de los cálculos. La correcta elección de los valores de presión iniciales utilizados para generar la geometría de las velas de la primera iteración, mejora la convergencia de los cálculos reduciendo el número de ciclos completos requeridos. En determinados casos de cálculo, con dos posibles soluciones, el sentido de la diferencia de presión (ΔP) entre los dos contornos de la vela determina la solución calculada.

Aunque el estudio realizado es preliminar y es fácilmente ampliable para extraer más información de los resultados, se pueden obtener unas primeras conclusiones genéricas y que son coherentes con el conocimiento general sobre velas. Las principales conclusiones son:

- Se confirma la gran influencia que tiene el foque sobre la mayor, debido a la modificación del perfil de entrada del viento de la mayor. La fuerza generada por unidad de longitud aumenta respecto a la obtenida con una única vela.
- El rendimiento de la vela mayor se ve degradado por la presencia del foque aguas arriba, el cuál modifica las condiciones de contorno de la mayor.
- En el caso de una única vela, la posición de la vela de máxima fuerza de avance coincide con la de máximo rendimiento, mientras que cuando están las dos velas, las posiciones del foque de máximo rendimiento y máximo avance no coinciden.

- La implementación de foque hace que el ángulo de botavara óptimo disminuye, ya que reduce la interacción negativa entre ambas velas. La fuerza de deriva se incrementa notablemente respecto a la de avance.

6.2 Perspectivas y trabajos posteriores

El estudio de los perfiles de vela y las fuerzas aerodinámicas inducidas representa un problema complejo con multitud de elementos de estudio. La herramienta desarrollada en este proyecto implementa una base sobre la cuál proseguir en la obtención de resultados como en la simulación global de veleros (velas y casco en 3D). A continuación, se detallan las principales perspectivas del proyecto, así como los diversos aspectos de mejora a evaluar.

Referente a las perspectivas globales:

- Desarrollo del modelo en 3D de las velas, lo que implica estudiar la deformación de la superficie de la vela en los módulos propiamente mecánicos de ANSYS. El estudio de la vela en 3D posibilita una comprensión completa del flujo.
- Estudio del problema hidrodinámico, pues la evaluación aislada de las fuerzas aerodinámicas supone una solución parcial para la optimización de los parámetros de trimado.
- Tras estudiar la vela mayor y el foque, es interesante implementar en el modelo el spinnaker, aunque se trata de una vela que trabaja con vientos portantes completaría el estudio aerodinámico en dos dimensiones del velero y las interacciones entre las velas.
- Serías interesante poder simular cierta rigidez en la vela simulando el efecto que producen los sables o rigidizadores de la vela, esto sería fácilmente implementable en el modelo de generación de perfiles introduciendo un término de resistencia flectora de la vela.

El modelo presentado ha permitido obtener perfiles de vela realistas, sin embargo, existe un gran potencial de mejora en varios aspectos:

- Integración de la cadena de cálculo. El desarrollo de una interfaz que permita por una parte automatizar las fases restantes (relectura de los contornos generados y generación de los ficheros de presión resultado), y por otra controlar el proceso iterativo global de forma autónoma, estableciendo un criterio de parada.
- Implementar la geometría del mástil en el contorno de la mayor generado, a fin de completar el estudio del flujo alrededor de la vela y evaluar la influencia del mástil en el rendimiento de esta.
- Estudiar el centro de presiones de las velas sobre el eje longitudinal del velero, como paso previo al estudio hidrodinámico. La posición del centro de presiones puede aportar pautas en relación con el reglaje de la quilla en cada caso.
- Mejorar la geometría en los extremos de las velas. Dada la importancia del borde de ataque y del borde de fuga en la simulación, es imperativo buscar soluciones más

realistas para unir los contornos extradós e intradós de la vela. Adicionalmente, la utilización de extremos de velas más armoniosos implicará un mallado de mayor calidad en esas regiones.

- Implementar el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$, más preciso que el modelo utilizado. Este modelo presenta una resolución numérica superior, pues se ha logrado hacer converger con éxito los casos de cálculo problemáticos.
- Mejorar el mallado automático, centrándose en la calidad de las mallas próximas a los contornos, mejorando así el tratamiento de pared de los cálculos, algo deficiente en las simulaciones realizadas.
- Dado el estado actual en el que se deja la herramienta de cálculo, el cuál permite realizar estudios paramétricos de una forma bastante ágil y automatizada, se considera que los trabajos posteriores deberían ir más orientados al análisis de los resultados obtenidos con el modelo, y el planteamiento de estudios paramétricos conducente a ampliar el conocimiento y sobre todo el entendimiento de los fenómenos que se producen en la interacción de las velas con el viento y sus implicaciones en la navegación.
- Por último, se está en condiciones de realizar validaciones de los resultados obtenidos en la simulación mediante la experimentación en túnel de viento de perfiles de vela. Para la realización de los test sería necesario un análisis dimensional previo para conseguir un escalado correcto.

Bibliografía

- [1] Peña Santiago, J. (2018). *Simulación mediante CFD del flujo alrededor de velas de barco (Trabajo de fin de grado)*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
- [2] *Formation pour le lancement des calculs NS3D sur Cannelle*. Safran Aircraft Engines, 2013. Documento confidencial interno.
- [3] de Pieri, J. S. (2016). Vertical Axis Wind Turbine (Part 1). Recuperado de Cornell University:
<https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=333371302>
- [4] ANSYS, Inc. (2015). ANSYS Help. Canonsburg, Pennsylvania, EE. UU.
- [5] CFD NINJA (2017). ANSYS FLUENT – NACA AIRFOIL 4412. Recuperado de CFDNINJA:
<https://cfd.ninja/ansys-fluent-naca-airfoil-4412/>
- [7] 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>
- [8] 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.
- [9] 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.

ANEXO I – Resultados estudio longitud de la escota

➤ Perfiles de las velas estudiadas

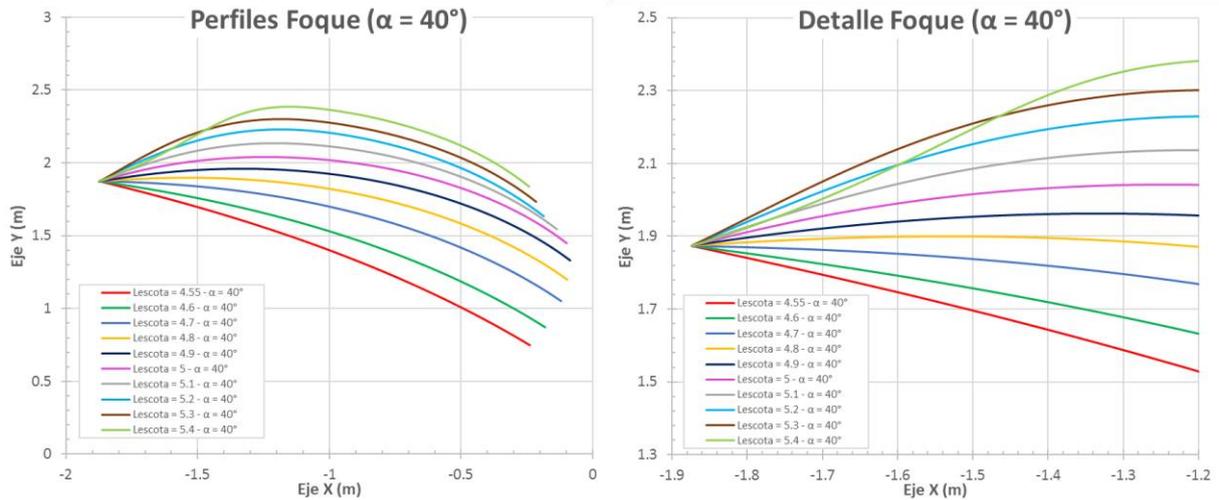


Ilustración 77 Perfiles del foque obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{escota}) con un ángulo de botavara (α) de 40°

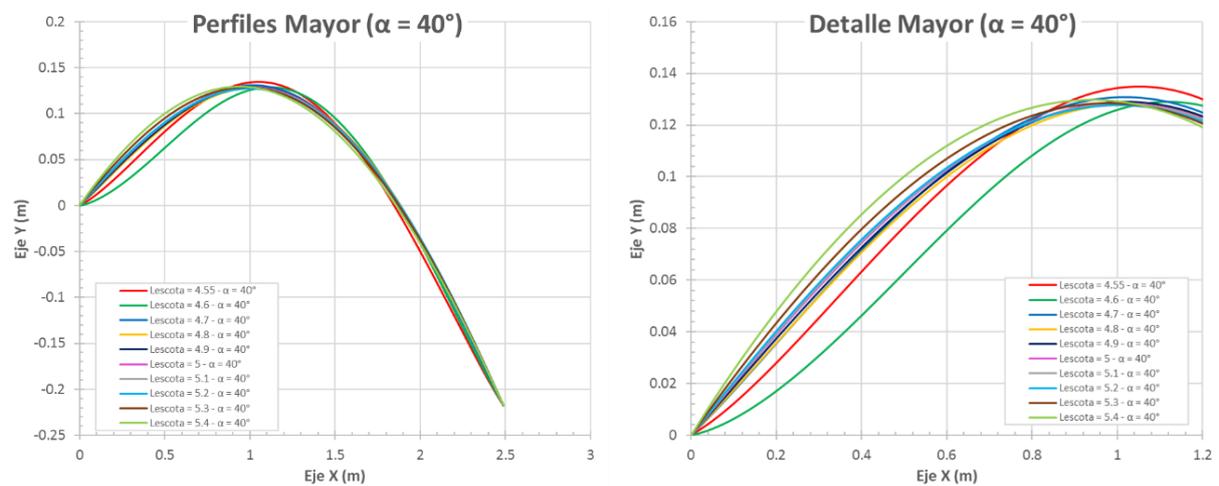


Ilustración 78 Perfiles de la vela mayor obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{escota}) con un ángulo de botavara (α) de 40°

➤ Contornos de presión

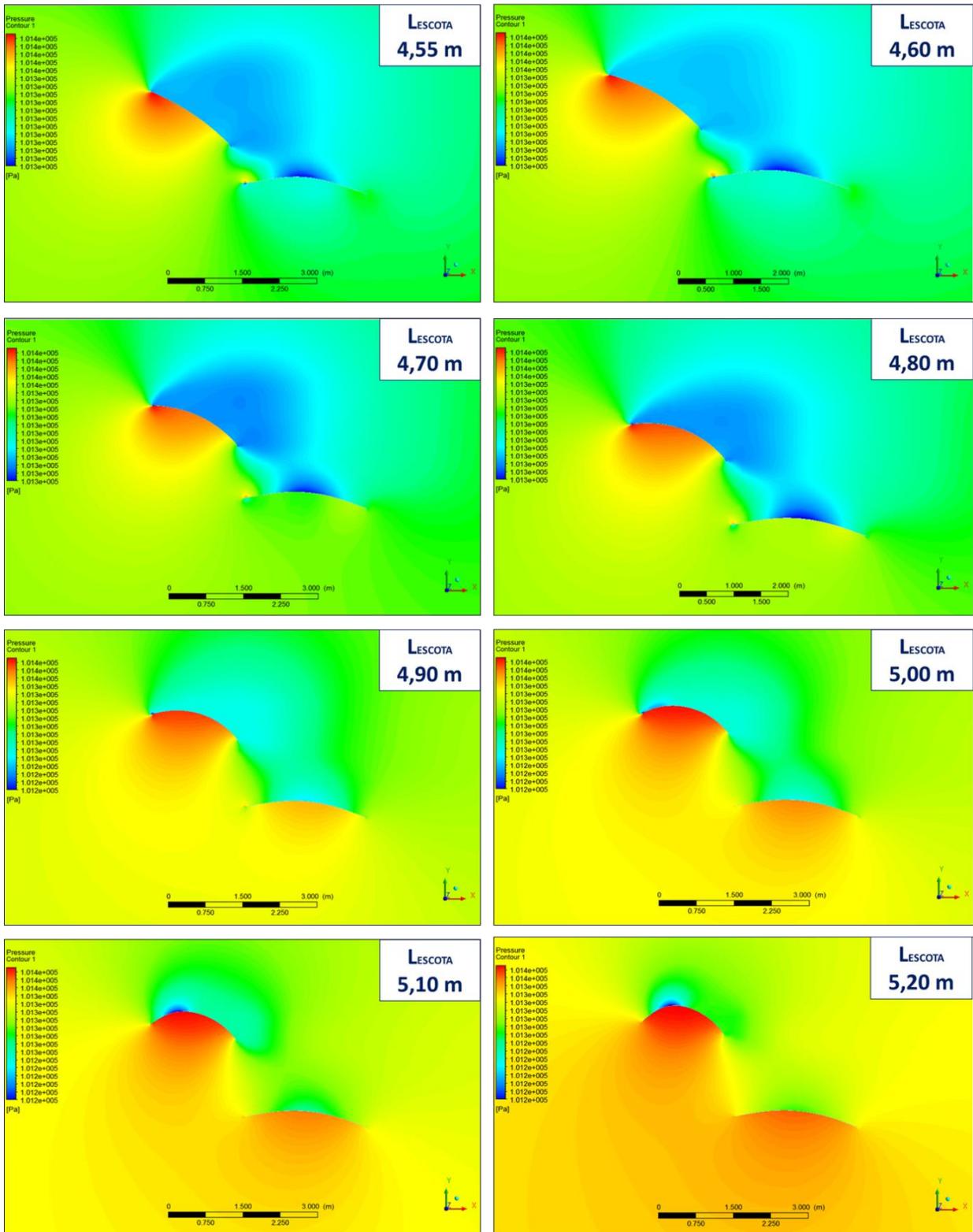


Ilustración 79 Contorno de presión total obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con un ángulo de botavara (α) de 40° (1/2)

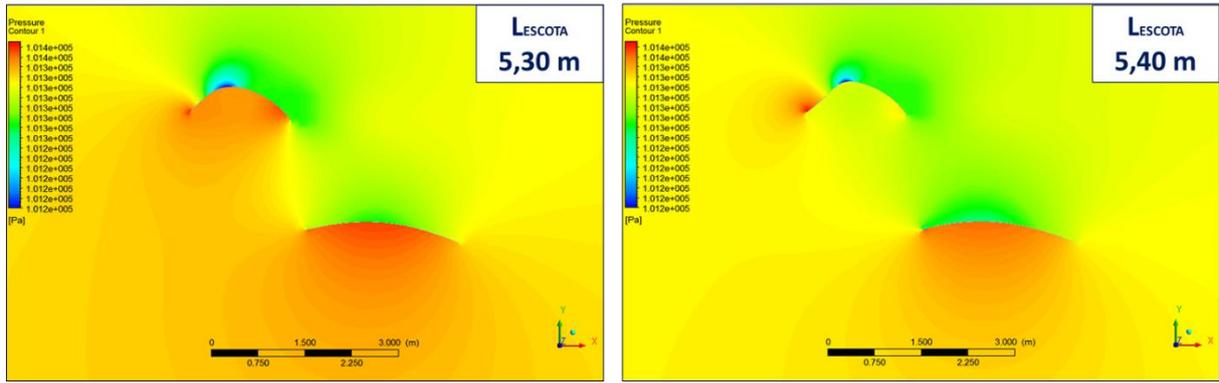


Ilustración 80 Contorno de presión total obtenidos para distintas longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con un ángulo de botavara (α) de 40° (2/2)

➤ Contornos de velocidad

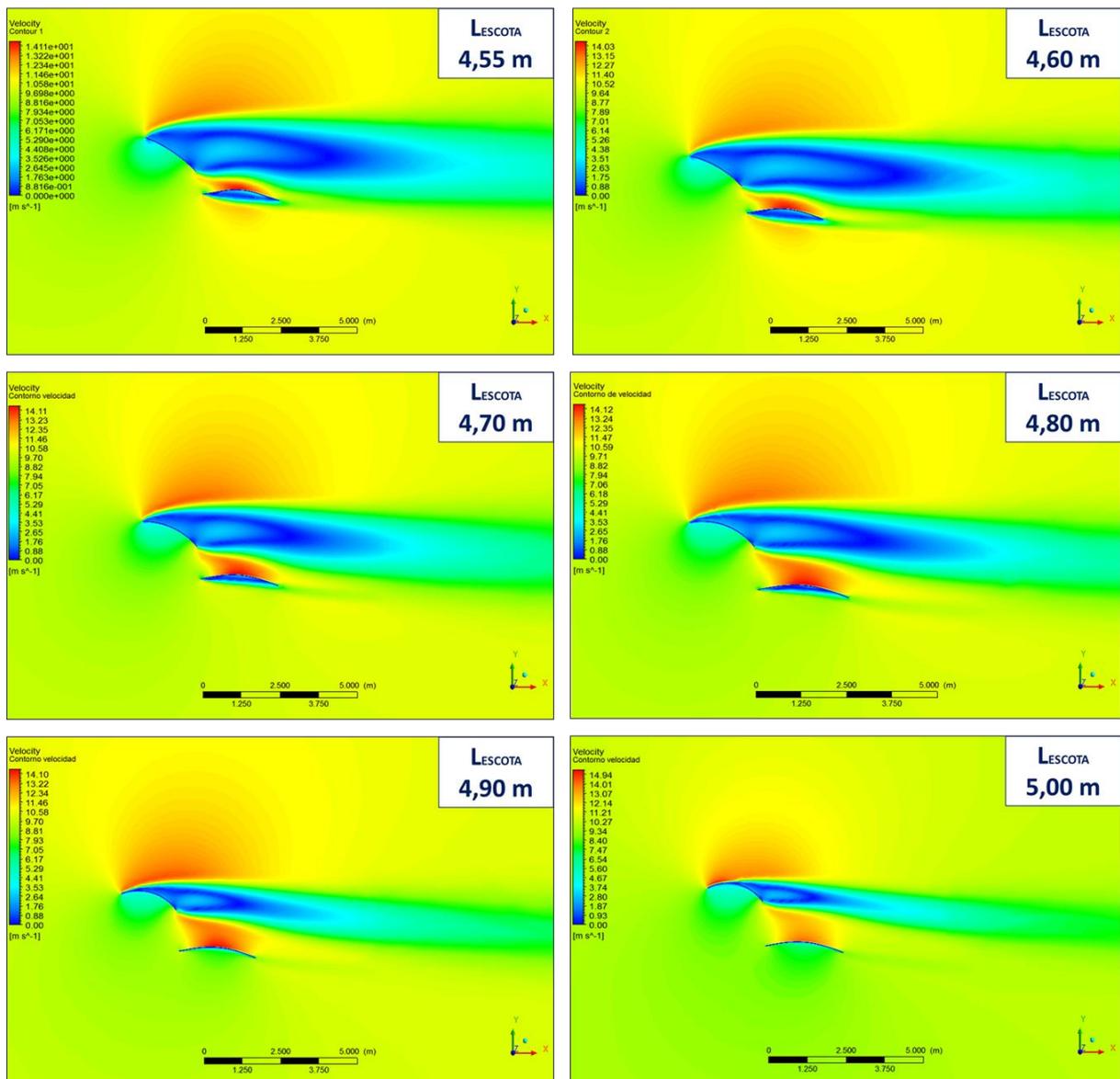


Ilustración 81 Contornos de velocidad para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (1/2)

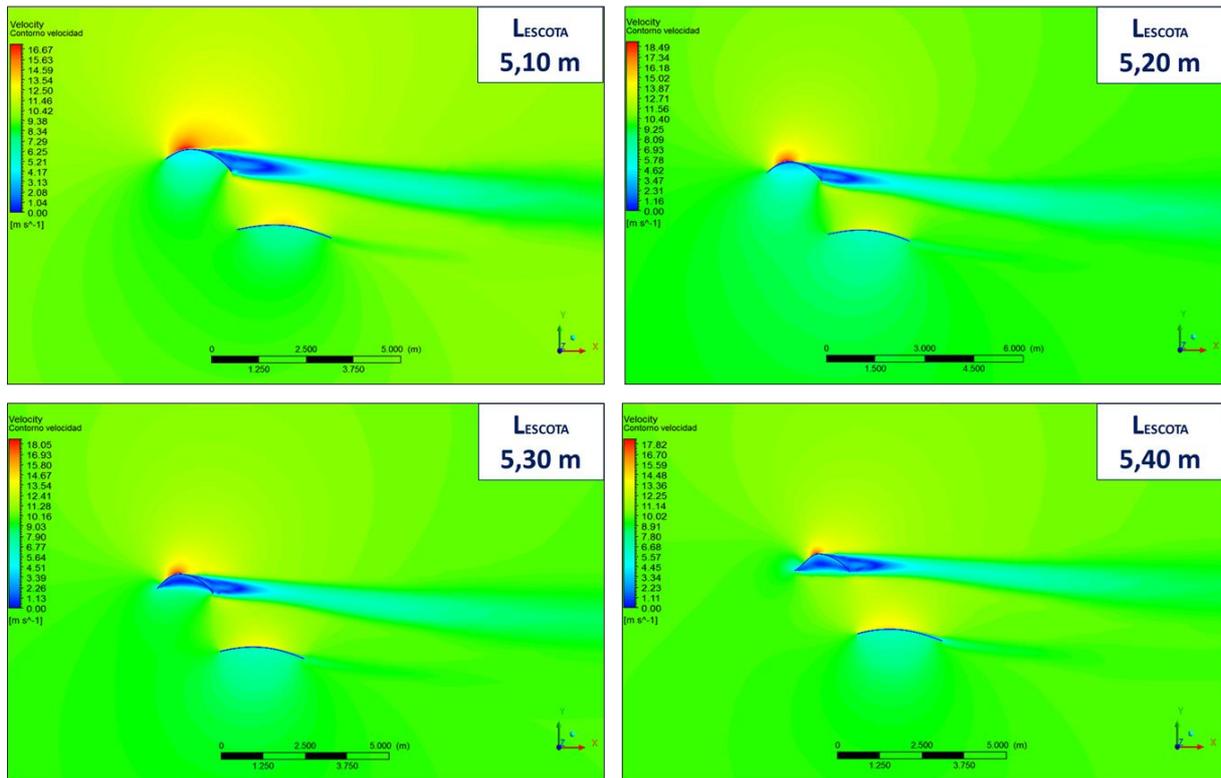


Ilustración 82 Contornos de velocidad para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (2/2)

➤ Contorno de viscosidad turbulenta

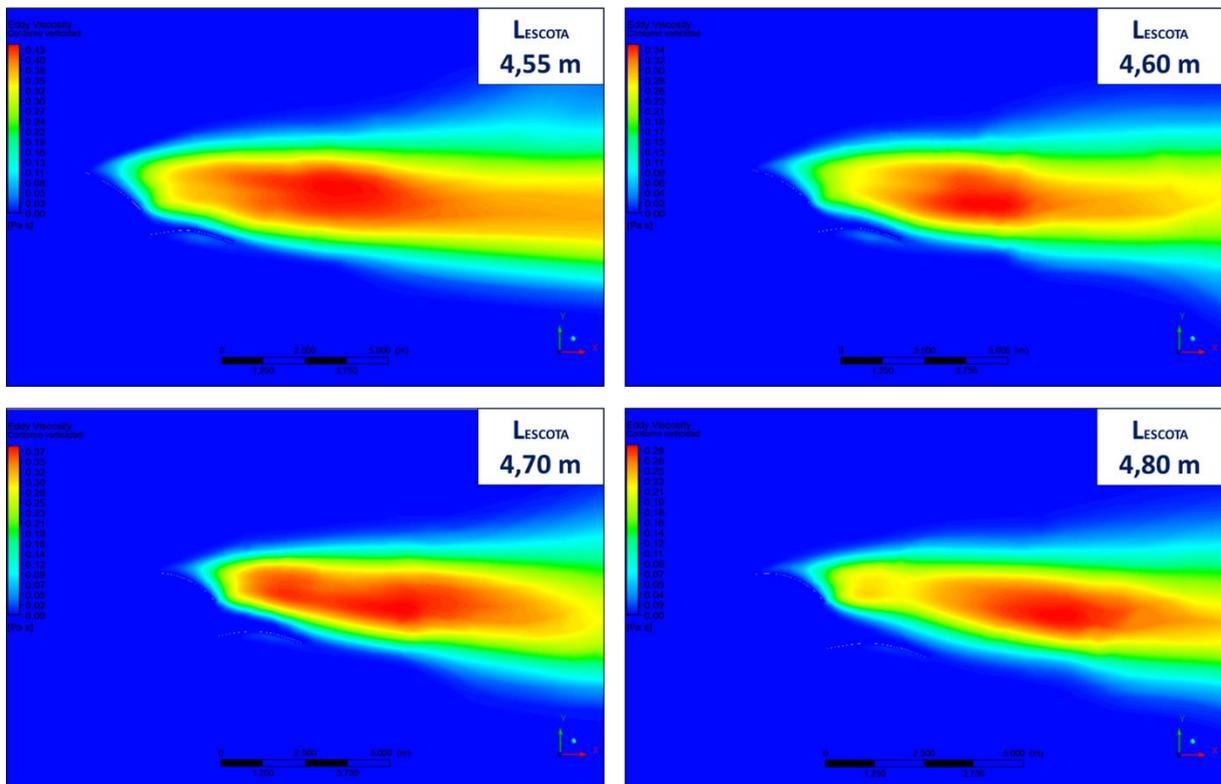


Ilustración 83 Contornos de viscosidad turbulenta para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (1/2)

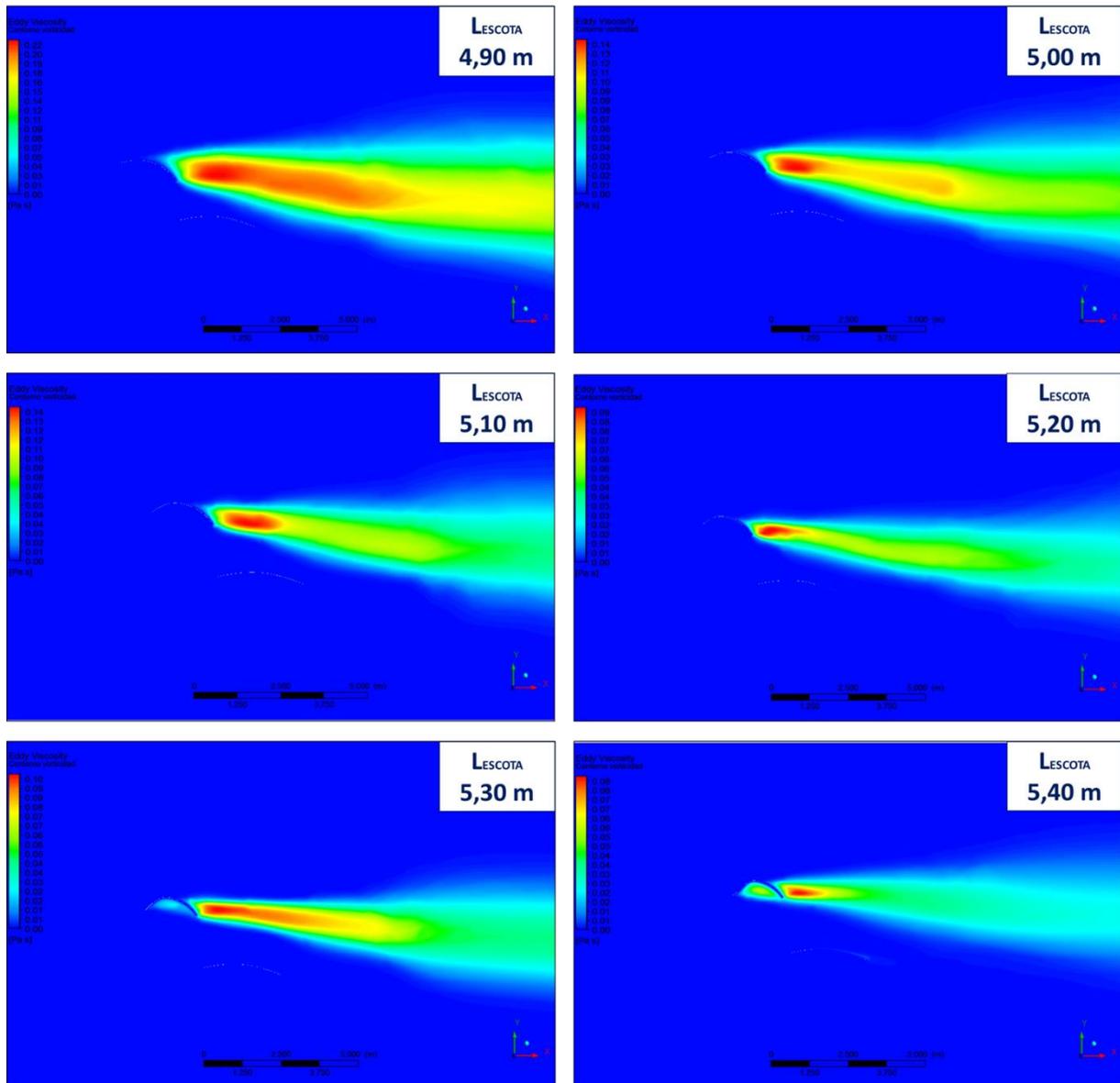


Ilustración 84 Contornos de viscosidad turbulenta para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (2/2)

➤ Líneas de corriente (velocidad)

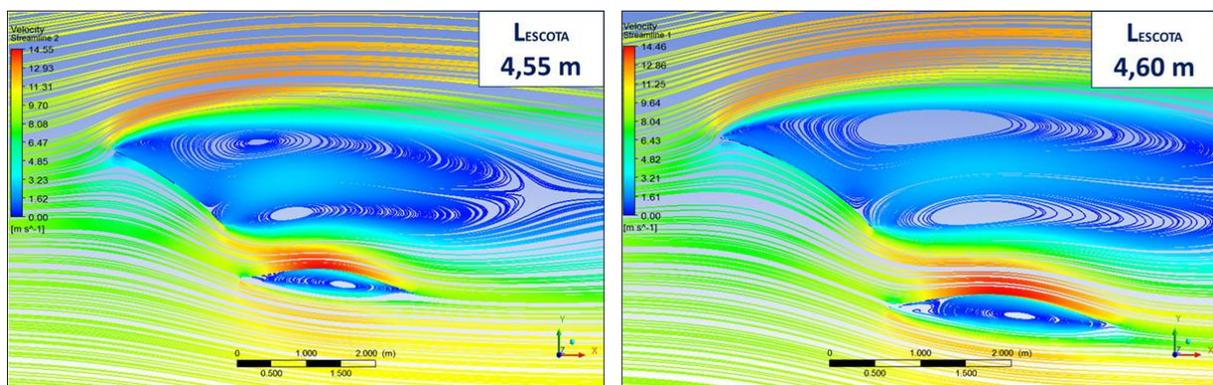


Ilustración 85 Líneas de corriente para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (1/2)

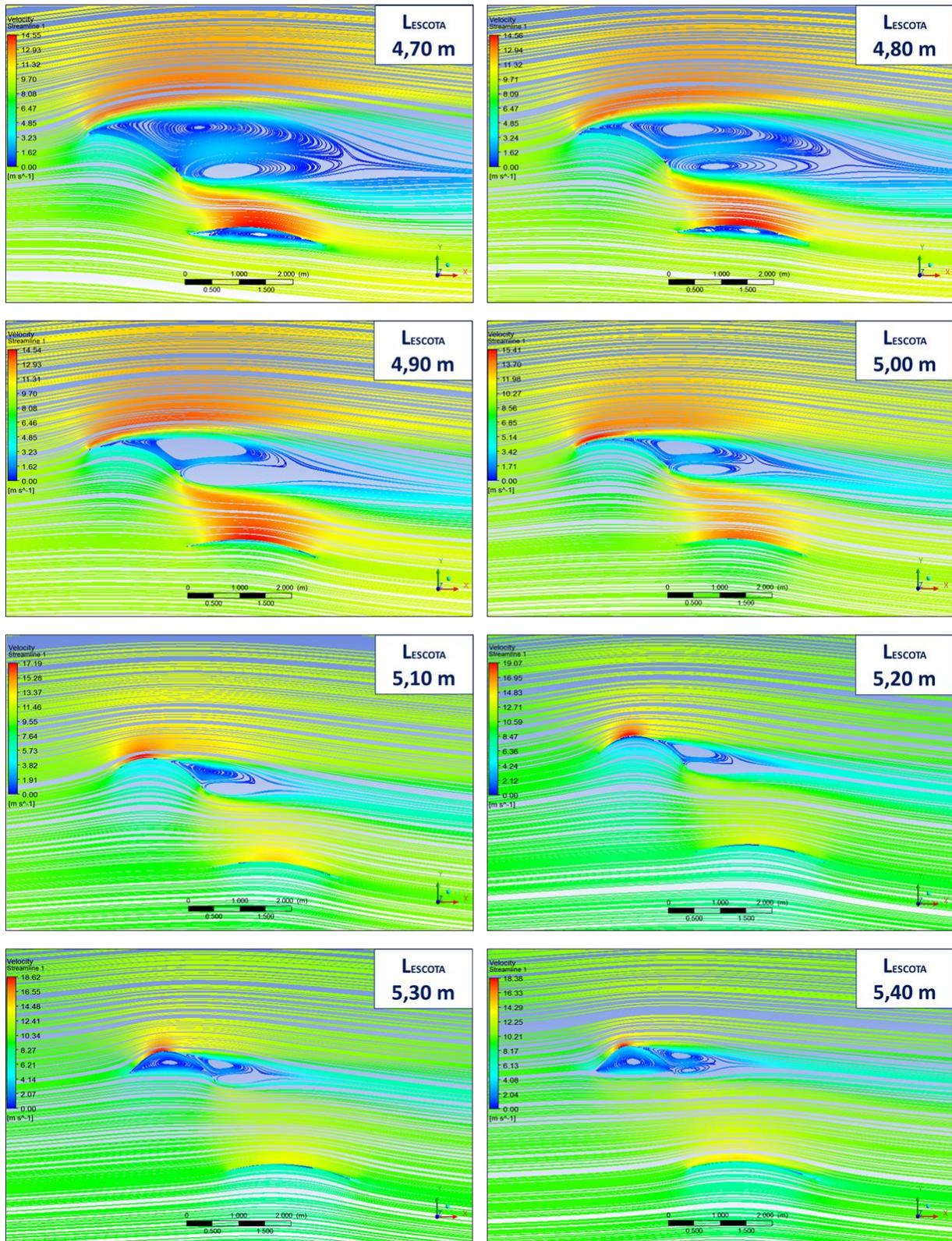


Ilustración 86 Líneas de corriente para diferentes longitudes de escota (L_{ESCOTA}) con ángulo de botavara (α) 40° (2/2)

ANEXO II – Resultados estudio ángulo de la botavara

➤ Contornos de presión

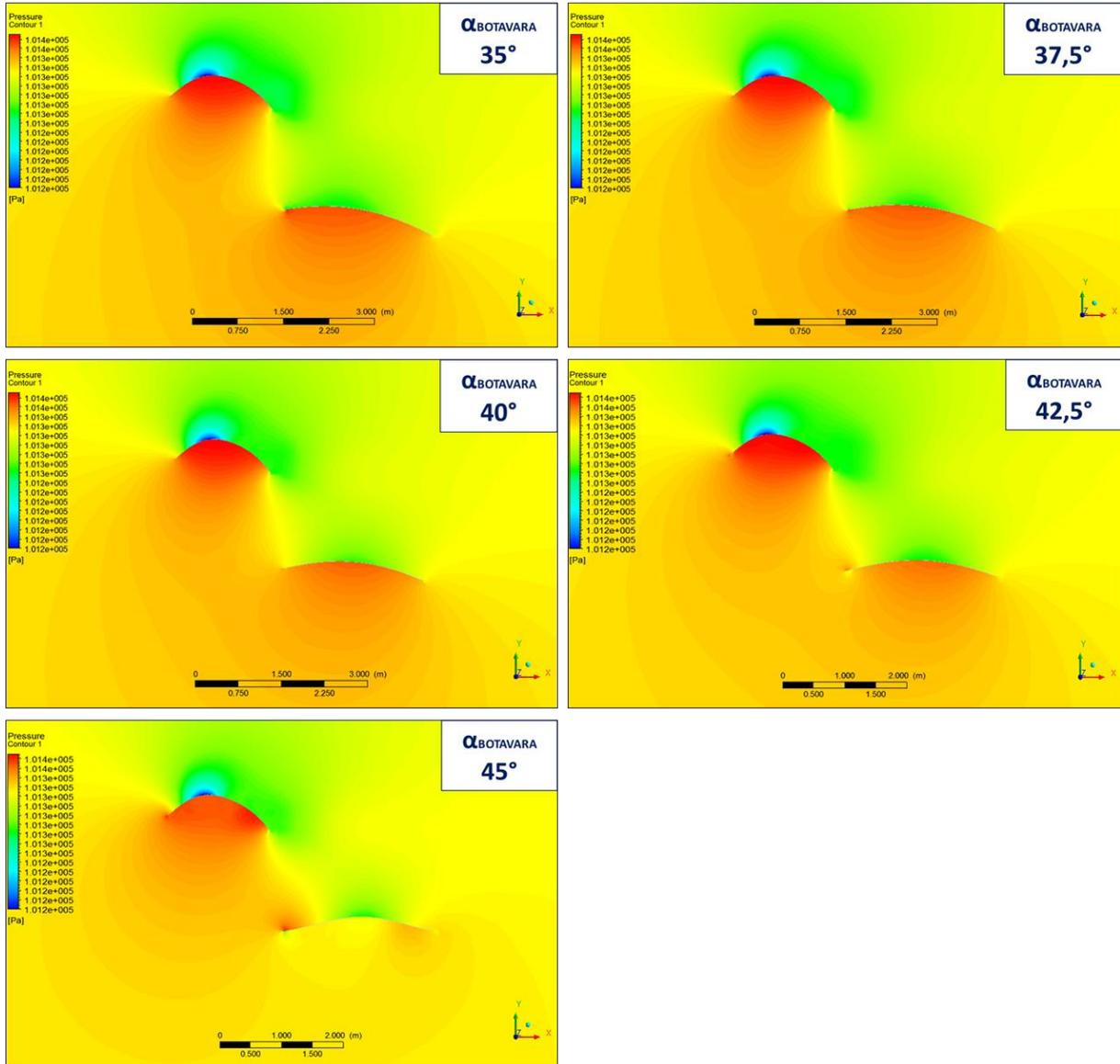


Ilustración 87 Contornos de presión estática para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros

➤ Contornos de velocidad

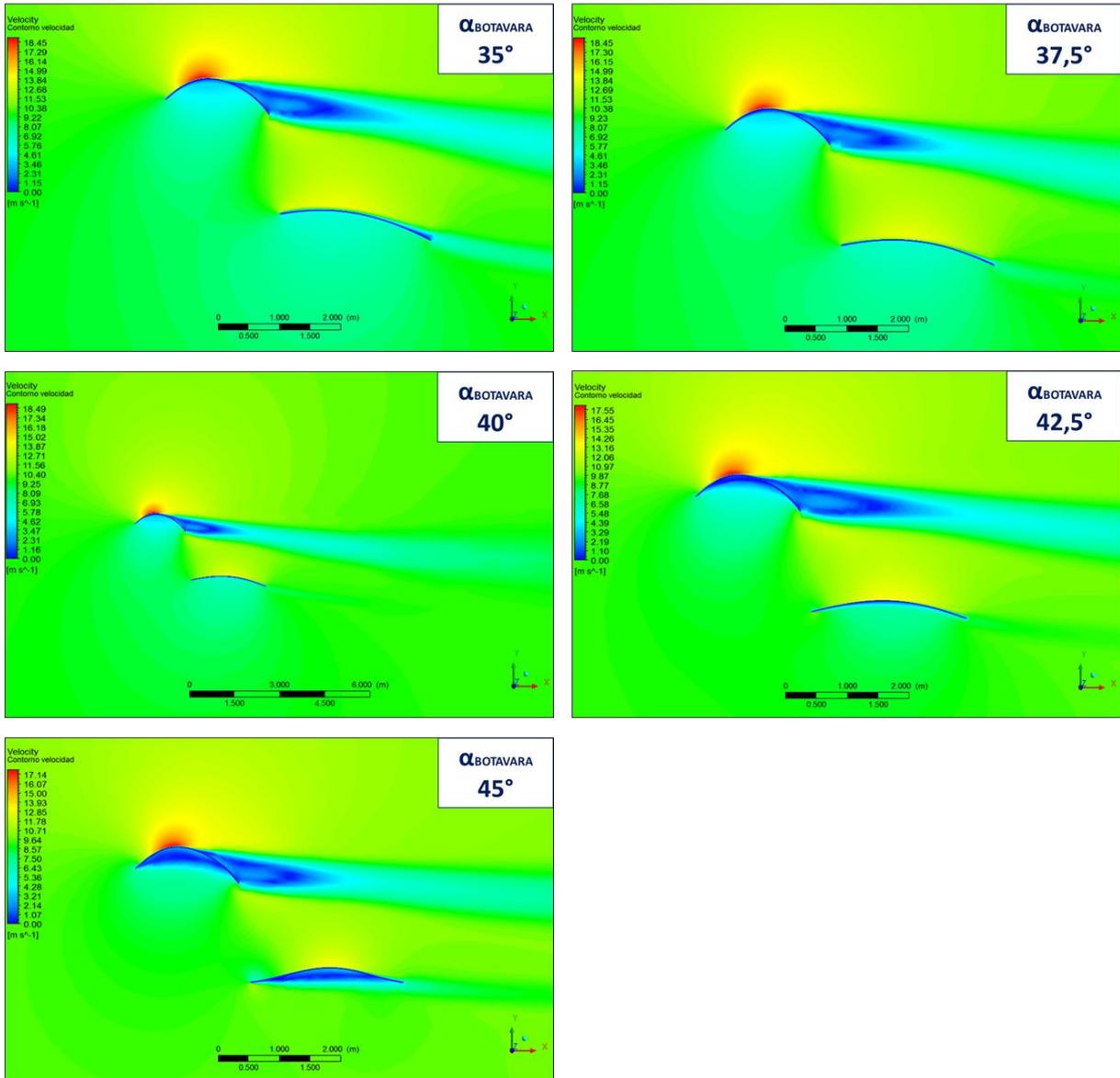


Ilustración 88 Contornos de velocidad para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros

➤ Contornos de viscosidad turbulenta

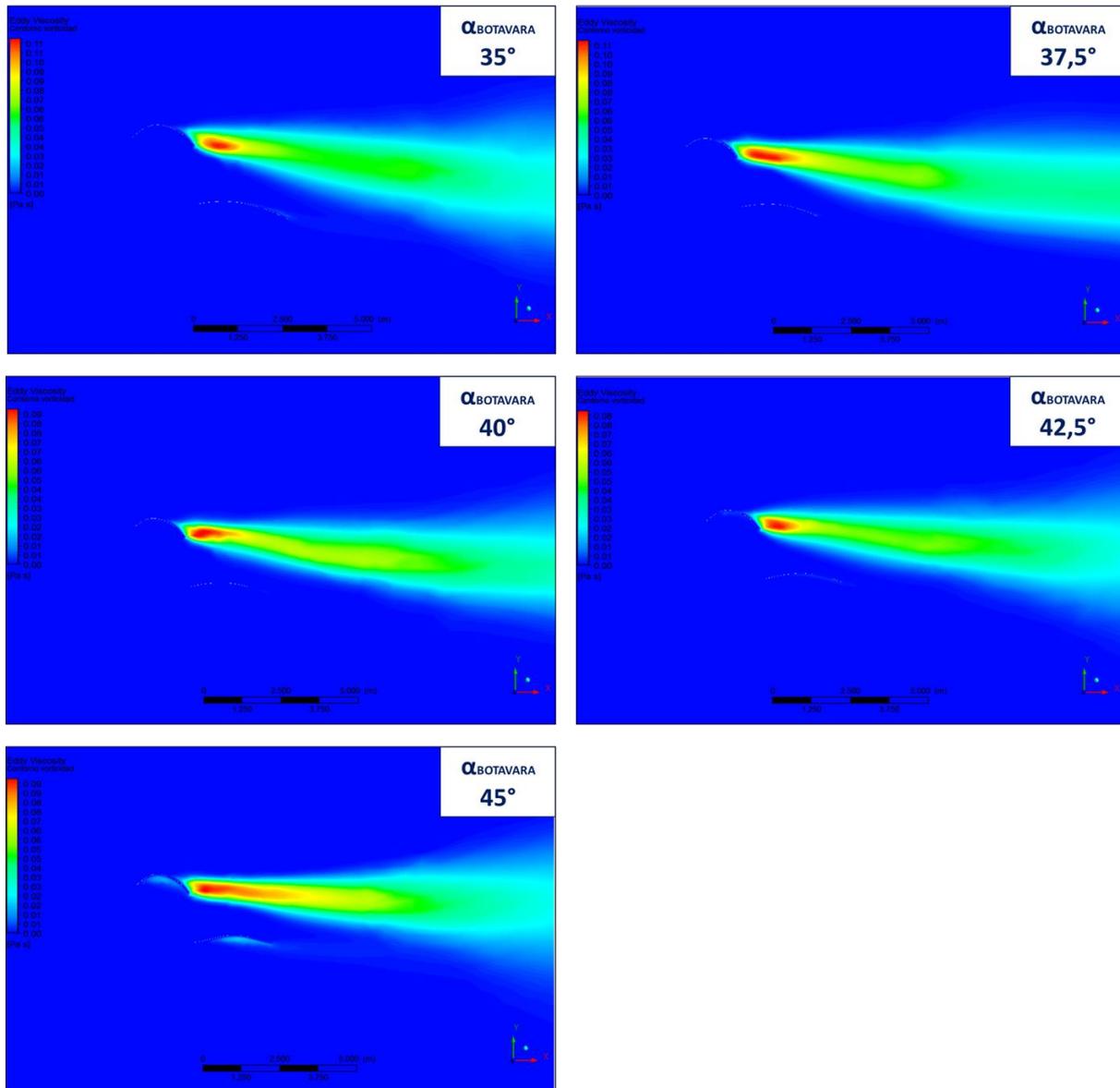


Ilustración 89 Contornos de viscosidad turbulenta para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros

➤ Líneas de corriente (*velocidad*)

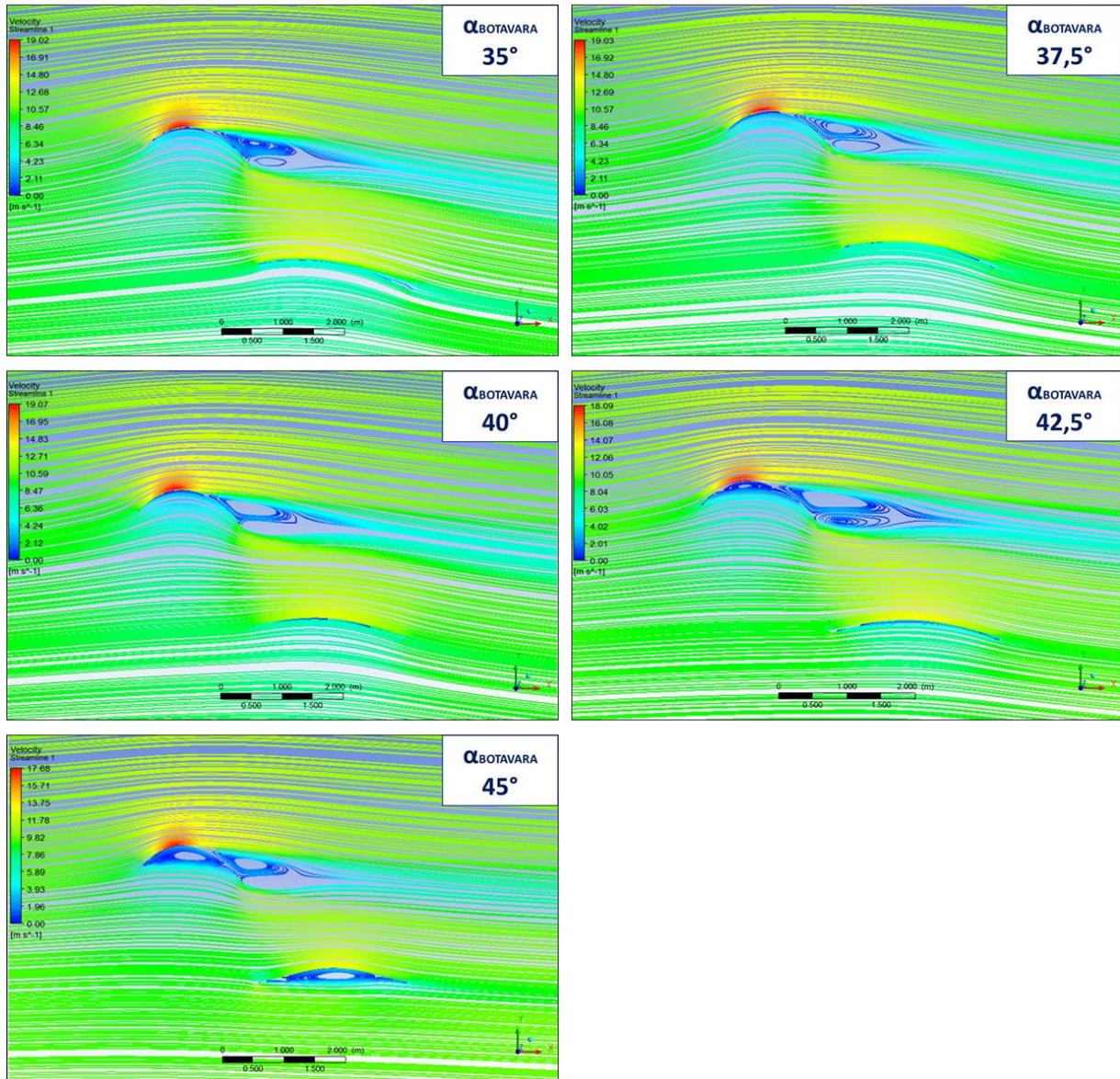


Ilustración 90 Líneas de corriente coloreadas por la velocidad para distintos ángulos de botavara (α) con una longitud de escota de 5,2 metros