

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOI

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**“Desarrollo y optimización de una pala de hélice de turbina ligera
para aprovechamiento de energía mareomotriz”**

Autor:

D. Manuel Adolfo García Rodríguez

Dirigido por:

Dr. Rafael Antonio Balart Gimeno

Dr. David García Sanoguera

Mayo 2018

RESUMEN

“Desarrollo y optimización de una pala de hélice de turbina ligera para aprovechamiento de energía mareomotriz”

En el presente Trabajo de Fin de Grado se realiza el diseño y cálculo de una de las palas empleadas en las hélices de las turbinas mareomotrices, las cuales están sometidas a solicitaciones significativas debidas a la alta densidad del agua del mar en las que operan. Es por ello que resulta de suma importancia un buen estudio de los materiales de aplicación, así como la elección de una geometría de pala idónea para obtener un buen rendimiento a la hora de transformar la energía cinética de las corrientes marinas en energía mecánica para posteriormente mediante un generador eléctrico producir electricidad.

Tras una breve introducción acerca de la historia y de los distintos tipos de energías que podemos obtener de las corrientes marinas y el oleaje se abordará el diseño de la pala.

El diseño consiste en la obtención de un modelo hidrodinámico y otro estructural, para el modelo hidrodinámico serán necesarios unos parámetros de entrada como por ejemplo la velocidad de la corriente marina. Las distintas fuerzas tangenciales y axiales que actuarán sobre la pala son provistas por el modelo hidrodinámico y se utilizarán como entrada para el modelo estructural, el cual proporcionará una distribución de las deformaciones a lo largo del tramo de la pala en función de los materiales que se hayan seleccionado. Se realizará una simulación hidrodinámica y otra estructural con la ayuda de un programa de elementos finitos, concretamente el programa SolidWorks.

Por último, se realizará un estudio económico de la pieza considerando los materiales utilizados y su proceso de fabricación.

SUMMARY

“Development and optimization of a lightweight tidal turbine blade for energy generation”.

The present final degree project presents the design and calculation of one of the blades employed in the propellers of tidal turbines, which are subjected to significant requests due to the high density of the sea water in which they operate. Consequently, it is very important to carry out a detailed study of the composite materials, as well as the election of the ideal blade to obtain a good performance when transforming the kinetic energy of the ocean currents into mechanical energy and then to electric energy.

The design of the blade will be conducted after a brief introduction about the history and the different types of energy that we can obtain from the ocean currents and the waves

The design consists on obtaining a hydrodynamic model and a structural model. The hydrodynamic model needs some input parameters like for example the speed of the sea current. The different tangential and axial forces that will act over the blade are supplied by the hydrodynamic model and will be used as the input for the structural model. The latter will provide a distribution of the deformations along the blade according to the materials selected. Then, a hydrodynamic and structural simulation will be carried out with the help of a program of finite elements called SolidWorks.

Finally, an economic study of the item will be conducted considering the materials employed and their manufacturing process.

RESUM

"Desenvolupament i optimització d'una pala d'hèlice de turbina lleugera per aprofitament d'energia mareomotriu"

En el present Treball de Fi de Grau es realitza el disseny i càlcul d'una de les pales empleades en les hèlices de les turbines mareomotriu, les quals estan sotmeses a sol·licitacions significatives degudes a l'alta densitat de l'aigua del mar en què operen. És per això que resulta de la màxima importància un bon estudi dels materials d'aplicació, així com l'elecció d'una geometria de pala idònia per a obtenir un bon rendiment a l'hora de transformar l'energia cinètica dels corrents marines en energia mecànica per a posteriorment per mitjà d'un generador elèctric produir electricitat.

Després d'una breu introducció sobre la història i dels distints tipus d'energies que podem obtenir dels corrents marines i l'onatge s'abordarà el disseny de la pala.

El disseny consisteix en l'obtenció d'un model hidrodinàmic i un altre estructural, per al model hidrodinàmic seran necessaris uns paràmetres d'entrada com per exemple la velocitat del corrent marina. Les distintes forces tangencials i axials que actuaran sobre la pala són proveïdes pel model hidrodinàmic i s'utilitzaran com a entrada per al model estructural, el qual proporcionarà una distribució de les deformacions al llarg del tram de la pala en funció dels materials que s'hagen seleccionat. Es realitzarà una simulació hidrodinàmica i una altra estructural amb l'ajuda d'un programa d'elements finits, concretament el programa SolidWorks.

Finalment, es realitzarà un estudi econòmic de la peça considerant els materials utilitzats i el seu procés de fabricació.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	3
SUMMARY	5
RESUM.....	7
ABREVIATURAS.....	13
LISTADO DE FIGURAS	17
LISTADO DE TABLAS.....	21
I. INTRODUCCIÓN	23
I.1. EL USO DE LA ENERGÍA.....	25
I.1.1. Historia.....	26
I.1.2. Tecnologías actuales para el aprovechamiento de la energía marina.....	28
I.1.2.1. Energía mareomotriz.....	28
I.1.2.2. Energía undimotriz.....	30
I.2. GEOMETRÍA E HIDRODINÁMICA DE LA PALA.....	33
I.2.1. Introducción. La pala de la turbina mareomotriz.....	33
I.2.2. Perfiles hidrodinámicos.....	34
I.2.2.1. Terminología de un perfil hidrodinámico.....	35
I.2.2.2. Tipos de perfiles.....	36
I.2.3. Fundamentos teóricos del perfil hidrodinámico.....	38
I.2.3.1. Teorema de Bernoulli.....	38
I.2.3.2. Fuerzas sobre un perfil.....	39
I.3. MATERIALES.....	45
I.3.1. Materiales compuestos.....	45
I.3.1.1. La matriz.....	45

1.3.1.2. El elemento de refuerzo.	47
1.3.1.3. Caracterización del comportamiento mecánico del compuesto.	48

II. OBJETIVOS.....51

II.1. OBJETIVO GENERAL.	53
II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.	53

III. DESARROLLO PROYECTO.....55

III.1. NORMATIVA APLICABLE.	57
III.2. DISEÑO INICIAL PROTOTIPO.	59
III.2.1. Selección del tipo de perfil hidrodinámico.	59
III.2.2. Selección de parámetros hidrodinámicos y obtención de coeficientes hidrodinámicos.	60
III.2.3. Cálculo de la geometría de la pala.	62
III.2.4. Diseño de la pala en CAD.	64
III.3. ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA PALA.	71
III.4. SELECCIÓN DE MATERIALES.	79
III.4.1. Composites.	79
III.4.2. Cálculo de constantes elásticas y resistentes por el método de Chamis.	80
III.5. ESTUDIO ESTÁTICO DE LA PALA.	85
III.5.1. Resultados del estudio estático para la CF_EP.	92
III.5.2. Resultados del estudio estático para la GF_EP.	96
III.6. DISEÑO FINAL.	101
III.7. FABRICACIÓN.	105
III.7.1. Moldeo por contacto <i>Laminación manual</i>	105
III.8. ESTUDIO ECONÓMICO.	109

IV. APÉNDICES115

IV.1. REFERENCIAS 117

IV.1.1. Referencias a figuras. 119

IV.2. ANEXOS..... 121

IV.2.1. Distribución de la geometría del perfil NACA 4418. 121

IV.2.2. Propiedades volumétricas de la pala..... 132

IV.3. PLANOS ACOTADOS..... 133

ABREVIATURAS

V_{BA}	Velocidad en el borde exterior
V_{EX}	Velocidad en el extradós
V_{IN}	Velocidad en el intradós
P_{BA}	Presión en el borde de ataque
P_{EX}	Presión en el extradós
P_{IN}	Presión en el intradós
V_1	Velocidad del agua sin perturbar
V	Velocidad del agua que pasa a través de la hélice
V_2	Velocidad del agua perturbada
A	Área barrida por las palas de la hélice
A_1	Área ficticia
A_2	Área ficticia aguas abajo
V_x	Velocidad del agua opuesta a V_1
a	Factor de inducción axial
a'	Factor de inducción de flujo tangencial
ω	Velocidad angular del rotor
r	Radio desde el extremo de la pala a un elemento del perfil
V_b	Velocidad tangencial
V_t	Velocidad tangencial neta

L_c	Longitud de la línea de cuerda
θ	Ángulo de torsión
ρ	Densidad
V_{SP}	Velocidad en la superficie de presión
V_{SS}	Velocidad en la superficie de succión
P_{SP}	Presión en la superficie de presión
P_{SS}	Presión en la superficie de succión
W	Velocidad resultante aparente
φ	Ángulo que forma W con el plano de rotación de la pala
α	Ángulo de ataque
β	Ángulo de anclaje
D	Fuerza de arrastre
L	Fuerza de sustentación
C_D	Coefficiente de arrastre
C_L	Coefficiente de sustentación
S	Área de la superficie expuesta a la corriente de agua
F_t	Fuerza tangencial o de par
F_a	Fuerza de empuje
R	Fuerza resultante
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Diferentes valores de tensiones
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Diferentes tipos de deformaciones

ε_f	Deformación de la fibra
ε_m	Deformación de la matriz
E_{f11}	Módulo de la fibra en la dirección longitudinal
E_{f22}	Módulo de la fibra en la dirección transversal
ν_{12}	Módulo de Poisson dirección x y
ν_{23}	Módulo de Poisson dirección y z
G_{12}	Módulo de cortadura en la dirección x y
G_{23}	Módulo de cortadura en la dirección y z
X_{ft}	Tensión de rotura de la fibra a tracción
X_{fc}	Tensión de rotura de la fibra a compresión
E_m	Módulo de la matriz
ν_m	Módulo de Poisson de la matriz
G_m	Módulo de cortadura de la matriz
S_{mT}	Tensión de rotura de la matriz a tracción
S_{mC}	Tensión de rotura de la matriz a compresión
S_{mS}	Tensión de rotura de la matriz a cortadura
V_f	Volumen de fibras
E_1	Módulo de Young en la dirección longitudinal
E_2	Módulo de Young en la dirección transversal
X_T	Máx. ten. de rotura a tracción en la dirección longitudinal
X_C	Máx. ten. de rotura a compresión en la dirección longitudinal

Y_T	Máx. ten. de rotura a tracción en la dirección transversal
Y_C	Máx. ten. de rotura a compresión en la dirección transversal
S_C	Máxima tensión de rotura a cortadura
σ_{11}	Tensión principal en la dirección longitudinal
σ_{22}	Tensión principal en la dirección transversal
σ_{12}	Tensión principal cortadura

LISTADO DE FIGURAS

Figura I.1. Rueda de Río Tinto.....	26
Figura I.2. Esquema de funcionamiento de un molino de mareas.....	27
Figura I.3. Central eléctrica mareomotriz en el estuario del río Rance.....	29
Figura I.4. Ejemplo de una turbina mareomotriz.	29
Figura I.5. Ejemplo de una central de energía mareomotriz con corrientes de agua marina.	30
Figura I.6. Central undimotriz de Motrico.	31
Figura I.7. Columna de agua oscilante, el movimiento ascendente y descendente de las olas empuja el aire a través de la turbina.....	31
Figura I.8. El movimiento de las olas accionan las bombas hidráulicas ubicadas en el interior de los cilindros.....	32
Figura I.9. Aparato flotante de partes articuladas que obtiene energía del movimiento relativo entre ambas partes.....	32
Figura I.10. Partes de una turbina mareomotriz. Podemos apreciar entre las diferentes partes, la caja de engranajes y el generador.	33
Figura I.11. Secciones transversales de una pala y evolución de perfiles.	34
Figura I.12. Terminología de las partes de un perfil hidrodinámico.	35
Figura I.13. NACA 4418.....	37
Figura I.14. NACA 24018.....	37
Figura I.15. La presión y la velocidad varían alrededor del perfil y la fuerza de sustentación es perpendicular al flujo del agua. $V_{SP2} \leq V_{SS2}$ y $P_{SP2} \geq P_{SS2}$	39
Figura I.16. Modelo de Betz.	39
Figura I.17. Velocidad inducida de flujo axial V_X	40
Figura I.18. Diagrama de vectores de velocidades y fuerzas en un elemento de la pala.	41

Figura I.19. Caracterización del comportamiento mecánico de la matriz.....	48
Figura I.20. Caracterización del comportamiento mecánico de la fibra.	48
Figura I.21. Caracterización del comportamiento mecánico del compuesto.	49
Figura I.22. NACA 4418.....	59
Figura III.23. Cl vs ángulo de ataque del perfil NACA 4418 para un Reynolds de 1.000.000	61
Figura III.24. Cl/Cd vs ángulo de ataque del perfil NACA 4418 para un Reynolds de 1.000.000.....	61
Figura III.25. Distribución de la longitud de cuerda (Lc)	63
Figura III.26. Distribución del ángulo de torsión (θ)	63
Figura III.27. Distintos planos empleados en el diseño de la pala.	64
Figura III.28. Comando curva por puntos XYZ.	65
Figura III.29. Introducción de coordenadas de perfil.....	65
Figura III.30. Convertir entidades.....	66
Figura III.31. Construcción de línea constructiva de 1/3 de la longitud de la cuerda. ..	66
Figura III.32. Mover entidades.	67
Figura III.33. Girar entidades.....	67
Figura III.34. Secuencia de perfiles girados en sus correspondientes ángulos de torsión.	67
Figura III.35. Operación de recubrir.	68
Figura III.36. Operación de equidistanciar.	68
Figura III.37. Pala completamente finalizada.....	69
Figura III.38. Comando “wizard”, primero se le da nombre a la simulación.....	71
Figura III.39. Selección de las unidades en sistema internacional (SI).....	72
Figura III.40. Selección del tipo de análisis y la dirección del agua.	72

Figura III.41. Selección del fluido y su régimen.....	73
Figura III.42. No influyen en el estudio estos parámetros.....	73
Figura III.43. Introducción de los parámetros de presión, velocidad y temperatura.	74
Figura III.44. Se define el volumen donde tendrá lugar la simulación.....	74
Figura III.45. Selección de las variables de presión dinámica y velocidad.	75
Figura III.46. Comando Run y Calculation control options.	75
Figura III.47. Se definen 50 iteraciones.....	76
Figura III.48. Muestra la visualización de las variables predefinidas de presión y velocidad.	76
Figura III.49. Comportamiento de la presión dinámica en la pala.....	77
Figura III.50. Comportamiento de la velocidad en la pala.	78
Figura III.51. Gráfico polar del laminado CF_EP.....	84
Figura III.52. Exportación de los resultados hidrodinámicos a la simulación.....	85
Figura III.53. Elección de nuevo estudio.	86
Figura III.54. Elección de análisis estático.....	86
Figura III.55. Edición y aplicación del material en el interior de la pala.	86
Figura III.56. Edición y aplicación del material en la superficie creada.	87
Figura III.57. Edición y aplicación del material en la superficie creada.	87
Figura III.58. Creación del laminado compuesto.....	88
Figura III.59. Unión rígida entre componentes.	88
Figura III.60. Selección de la sujeción fija en la raíz de la pala.....	89
Figura III.61. Introducción de las presiones generadas en “Flow Simulation”.....	89
Figura III.62. Creación del mallado.	90
Figura III.63. Resultados que desean obtener.....	90
Figura III.64. Ejecución del estudio.....	90

Figura III.65. Resultados de la tensión principal σ_{11} para la CF_EP.	92
Figura III.66. Resultados de la tensión principal σ_{22} para la CF_EP.	92
Figura III.67. Resultados de la tensión principal σ_{12} para la CF_EP.	93
Figura III.68. Resultados del factor de seguridad para la CF_EP.	94
Figura III.69. Resultados de los desplazamientos para la CF_EP.	95
Figura III.70. Resultados de la tensión principal σ_{11} para la GF_EP.	96
Figura III.71. Resultados de la tensión principal σ_{22} para la GF_EP.	96
Figura III.72. Resultados de la tensión principal σ_{12} para la GF_EP.	97
Figura III.73. Resultados del factor de seguridad para la GF_EP.	98
Figura III.74. Resultados de los desplazamientos para la GF_EP.	99
Figura III.75. Esquema del proceso de moldeo por contacto.	106
Figura III.76. Molde abierto en el que se aplican los procesos descritos anteriormente.	106

LISTADO DE TABLAS

Tabla III.1. Tabla con los distintos parámetros iniciales para un perfil NACA 4418	60
Tabla III.2. Criterios hidrodinámicos óptimos.....	62
Tabla III.3. Parámetros geométricos de diseño de la pala.....	62
Tabla III.4. Propiedades de la Fibra de Carbono y resina epoxy. (El subíndice 1 corresponde a la dirección X, el 2 corresponde a la dirección Y, el 3 corresponde a la dirección Z).....	80
Tabla III.5. Propiedades mecánicas de la CF_EP.....	82
Tabla III.4. Propiedades de la Fibra de Vidrio y resina epoxy. (El subíndice 1 corresponde a la dirección X, el 2 corresponde a la dirección Y, el 3 corresponde a la dirección Z).....	83
Tabla III.5. Propiedades mecánicas de la GF_EP.....	83
Tabla III.6. Teoría del fallo de máxima tensión.....	91
Tabla III.6. Comparación de resultados con la teoría del fallo.....	93
Tabla III.7. Comparación de resultados con la teoría del fallo.....	97
Tabla III.8. Comparación de los coeficientes de seguridad de ambos materiales compuestos.....	101
Tabla III.9. Comparación de los desplazamientos máximos de ambos materiales compuestos en el extremo de la pala.....	102
Tabla III.10. Precios de ambos materiales compuestos.....	102
Tabla III.11. Ventajas e inconvenientes del proceso del moldeo por contacto.....	107

I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I. Introducción

I.1. EL USO DE LA ENERGÍA.

La energía ha sido prioritaria para el desarrollo de la civilización y ha impactado satisfactoriamente en la calidad de vida de la población. Más del 85% del consumo energético mundial para la generación de electricidad, la industria y el transporte proviene de la utilización de combustibles fósiles. El consumo creciente de distintas formas de productos energéticos para la producción ha generado efectos adversos en los planos ambiental, socioeconómico y geopolítico. En consecuencia, durante el último tercio del siglo XX y principios del actual, diversos factores han presionado para la utilización a mayor escala de fuentes alternas de energía. Desde el punto de vista ambiental, el problema más preocupante es el efecto invernadero, el cual debido a gases producto de la quema de combustibles fósiles.

La reciente preocupación por los efectos que la acción del hombre produce sobre el medio ambiente y la probabilidad de que se agoten los combustibles fósiles han hecho que se estudien alternativas que garanticen el desarrollo sostenible y han facilitado que se vuelva de nuevo la atención hacia las antiguas fuentes naturales de energía, el agua y el viento, así como otras fuentes de energía como la solar y la geotérmica. Surgen así iniciativas innovadoras que se centran en el desarrollo de las energías alternativas y renovables y hacen que se hable de desarrollar una economía sostenible, que no ponga en peligro la supervivencia de la raza humana. Se habla de energía renovable para referirse a la energía que aprovecha fuentes naturales que son inagotables. Se define energía alternativa como aquella que puede sustituir a las fuentes de energías actuales.

Las proyecciones del consumo energético en Europa (3.690 TWh eléctricos en el año 2020, 4.050 TWh en el año 2030, y 5.000 TWh en el año 2050) parecen sugerir que la estrategia energética de la Comisión Europea y de los Estados Miembros debería de tener en cuenta el enorme potencial energético marino para disminuir la dependencia energética de las materias primas de otros continentes y, especialmente, para evitar depender geopolíticamente del consumo de combustibles fósiles que se encuentran mayoritariamente en los yacimientos de Rusia, Venezuela y Oriente Medio.

I. Introducción

I.1.1. Historia.

Durante grandes etapas de la prehistoria e historia, el hombre no contó con otras fuentes de energías, que las derivadas de su propia fuerza física, las de utilización de animales de tiro y las que utilizaban la fuerza del viento y del agua, fundamentalmente a través de molinos hidráulicos y eólicos.

La cultura grecorromana ya conocía la técnica del molino hidráulico. En el siglo I a. C., el arquitecto, ingeniero y tratadista romano Marco Vitrubio en el décimo libro de su tratado *De Architectura*, el más antiguo sobre arquitectura conservado, describió una rueda hidráulica vertical con unas aletas que transmitían su movimiento, al ser empujada por el agua por medio de unos engranajes o muelas. Los restos de ruedas de agua empleadas para la elevación de agua fueron descubiertos cuando las antiguas minas fueron reabiertas en Río Tinto en España.

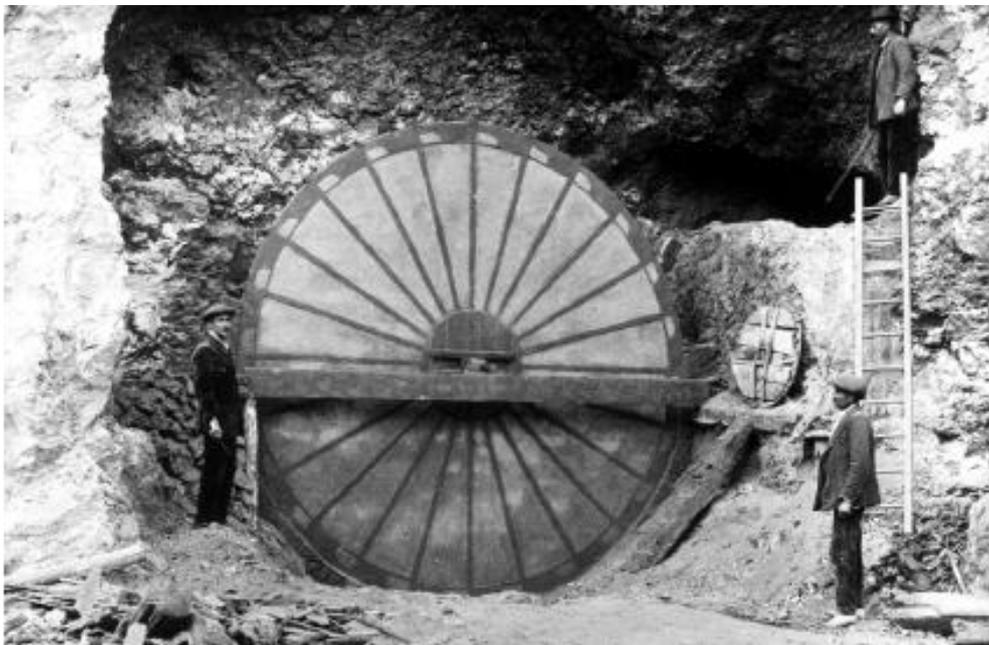


Figura I.1. 'Rueda de Río Tinto.

I. Introducción

Los molinos de mareas en vez de utilizar la fuerza del agua de los ríos en su descenso hacia el mar, aprovechan las subidas y bajadas periódicas del nivel del mar para poner en marcha los mecanismos que hacen girar las piedras del molino, responsables de la trituración del cereal. Cuando la marea sube, el agua va inundando la zona en la que se almacena, contenida en un dique. Una vez alcanzada la pleamar o marea alta, el agua queda retenida mediante un sistema de compuertas. Cuando la marea comienza a bajar y hay un desnivel suficiente, se abren las compuertas, liberando el agua hacia el mar. El flujo del agua hace girar una rueda que transmite la energía a los engranajes que accionan la piedra del molino. Después de la bajamar o marea baja, el nivel del agua empieza a subir de nuevo y el molino va perdiendo potencia hasta que se detiene. Existen referencias históricas que datan este tipo de estructuras arquitectónicas en Francia e Inglaterra en el siglo XII.

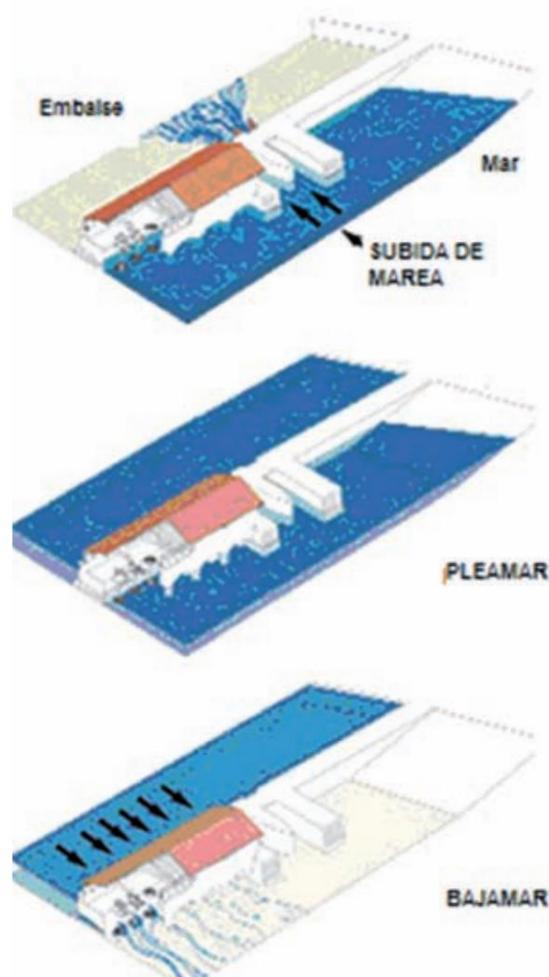


Figura I.2. "Esquema de funcionamiento de un molino de mareas.

I. Introducción

En el caso de España encontramos una alta concentración de este tipo de molinos en Cantabria. También está constatada su construcción en el litoral atlántico de Andalucía. En Galicia la mayor concentración de este tipo de estructuras arquitectónicas se da en el fondo de las rías y en pequeñas ensenadas donde se dan las condiciones ideales para aprovechar el flujo y el reflujó de las mareas. No se puede dejar de mencionar su existencia en la zona del País Vasco y Asturias.

I.1.2. Tecnologías actuales para el aprovechamiento de la energía marina.

Las masas de aguas marinas contienen una gran cantidad de energía, producto de sus movimientos como consecuencia de la acción gravitatoria de la luna y el sol (mareas), la fuerza de los vientos (oleaje, corrientes), el movimiento de rotación de la tierra (corrientes geostroficas), y la diferencia de temperaturas entre las masas de aguas marinas (corrientes y gradientes térmicos). A continuación, se describen las tecnologías asociadas a cada una de esas fuentes energéticas.

I.1.2.1. Energía mareomotriz.

La energía mareomotriz puede generar electricidad de dos formas:

Energía potencial de las mareas: La energía generada a través de las mareas es ventajosa ya que es renovable y muy predecible en diferentes escalas temporales (diaria, mensual, anual), lo cual permite una buena planificación para su aprovechamiento. La energía potencial contenida en el desnivel de las aguas se aprovecha mediante la construcción de represas semejantes a las hidroeléctricas. El agua represada se transforma posteriormente en energía cinética mediante la apertura de compuertas que permiten sus desplazamientos hacia turbinas que transforman dicha energía cinética en mecánica, y posteriormente en electricidad mediante acoplamiento de la turbina a un generador eléctrico. Un ejemplo es la central de *La Rance* en Francia, la cual presenta una potencia de 240 MW, y una producción media de 550 GWh, el nivel de variación de marea es de 13,5 m.

I. Introducción



Figura I.3. ⁱⁱⁱCentral eléctrica mareomotriz en el estuario del río Rance.

Energía cinética de las mareas: La energía cinética se genera por el flujo del caudal de agua en el caso de las mareas, de esta forma se puede aprovechar eficientemente ese flujo de energía transformando el movimiento de desplazamiento (corriente marina o también conocida por *tidal stream*) en un movimiento de rotación por medio de turbinas. La turbina convenientemente acoplada a un generador eléctrico produce la energía eléctrica.

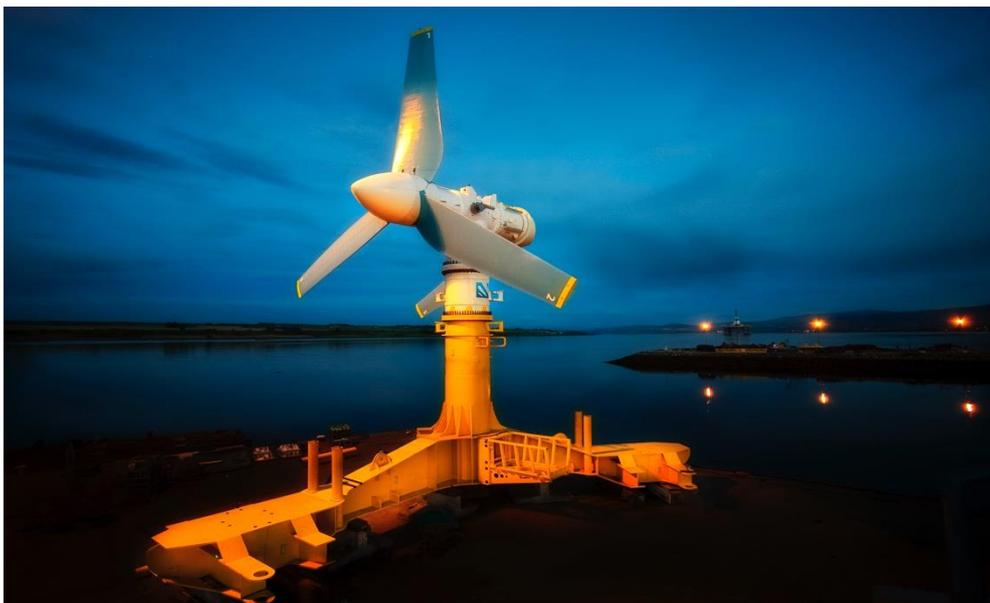


Figura I.4. ^{iv}Ejemplo de una turbina mareomotriz.

I. Introducción

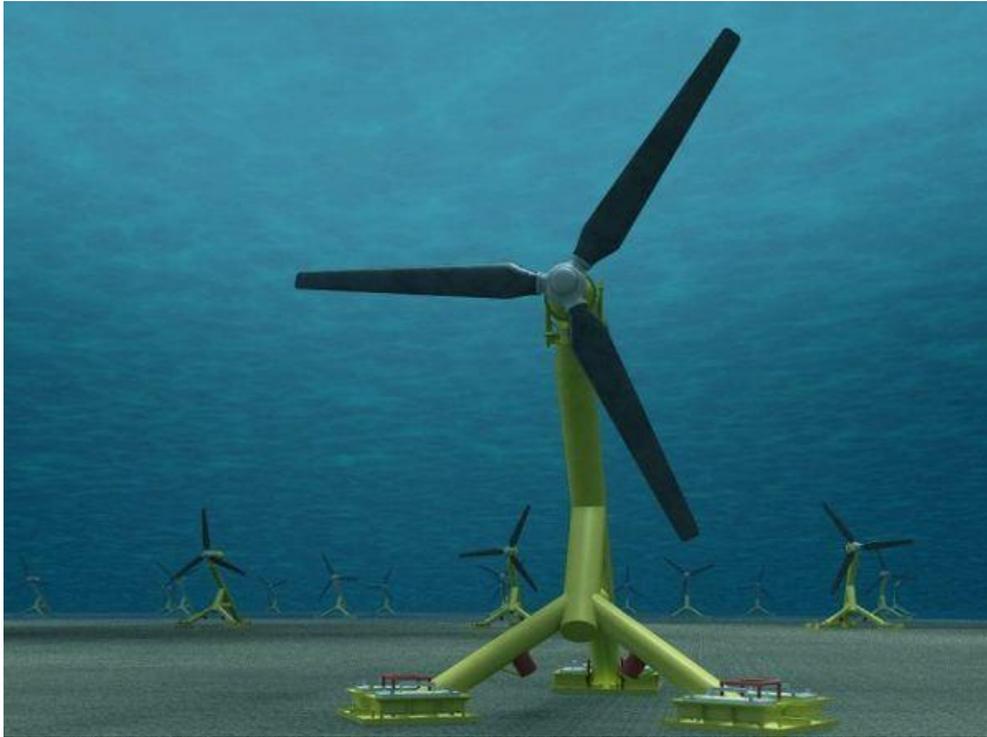


Figura I.5. *Ejemplo de una central de energía mareomotriz con corrientes de agua marina.

I.1.2.2. Energía undimotriz.

En cuanto al oleaje, este posee dos componentes energéticos, uno cinético y otro potencial, el cual puede ser aprovechado por diferentes tipos de dispositivos, acoplados a un generador eléctrico: captación de movimiento variable a través de estructura flexible semisumergida con sistema hidráulico, estructuras flotantes en las cuales las olas las sobrepasan y mueven pequeñas turbinas, boyas semisumergibles o completamente sumergidas que mueven una turbina o estructuras construidas en la costa en las que el oleaje mueve una columna de aire la cual hace girar una turbina.

Columna de agua oscilante:

En España en la población guipuzcoana de Motrico, se inauguró el 8 de julio de 2011 una central undimotriz ubicada en el dique exterior del puerto que utiliza la tecnología denominada columna de agua oscilante (OWC Oscilating Water Column).

I. Introducción



Figura I.6. ^{vi}Central undimotriz de Motrico.

Cuando el nivel de agua en una cámara cerrada asciende y desciende debido al movimiento de las olas, provoca que el aire pase a través de las turbinas. La turbina trabaja por partida doble, una cuando la ola asciende y empuja el aire en el interior de la cámara y otra cuando la ola desciende succionando aire del exterior.

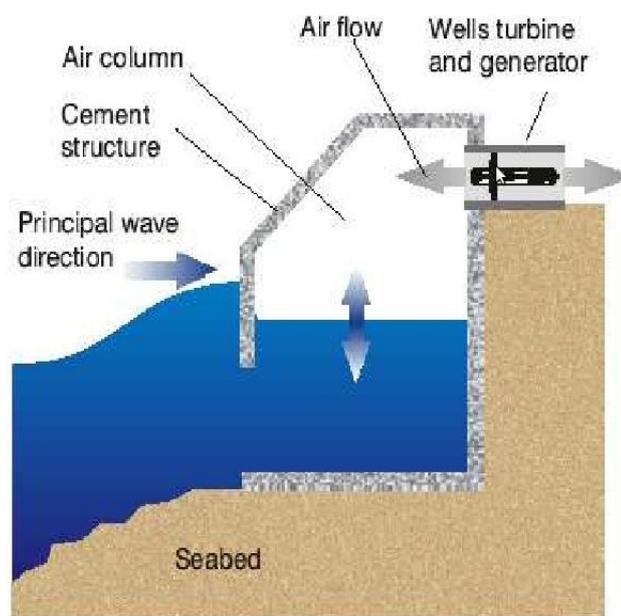


Figura I.7. ^{vii}Columna de agua oscilante, el movimiento ascendente y descendente de las olas empuja el aire a través de la turbina.

I. Introducción

Estructura flexible semisumergida: Este sistema se basa en aprovechar mecánicamente el movimiento de las olas a través de dispositivos de gran extensión que copian la rugosidad de la superficie del agua articulando movimientos de bisagras. El movimiento ondulatorio del oleaje hace funcionar sistemas hidráulicos que al ser accionados bombean fluidos que hacen girar generadores eléctricos.



Figura I.8. ^{viii}El movimiento de las olas accionan las bombas hidráulicas ubicadas en el interior de los cilindros.

Ejemplos de otros tipos de dispositivos articulados que siguen el movimiento de las olas que actúan sobre un generador hidráulico:



Figura I.9. ^{ix}Aparato flotante de partes articuladas que obtiene energía del movimiento relativo entre ambas partes.

I. Introducción

I.2. GEOMETRÍA E HIDRODINÁMICA DE LA PALA.

En este apartado se abordarán los aspectos más relevantes en relación a las palas de una turbina mareomotriz. De lo que se trata es de obtener unas nociones teóricas básicas para el correcto diseño geométrico e hidrodinámico de la pala.

I.2.1. Introducción. La pala de la turbina mareomotriz.

Las palas de la turbina crean sustentación debido a la hidrodinámica resultante de las fuerzas de flujo de entrada que son perpendiculares al plano del rotor. Estas fuerzas hacen que las palas giren y el par resultante se transfiera a través de un eje y caja de engranajes a un generador.

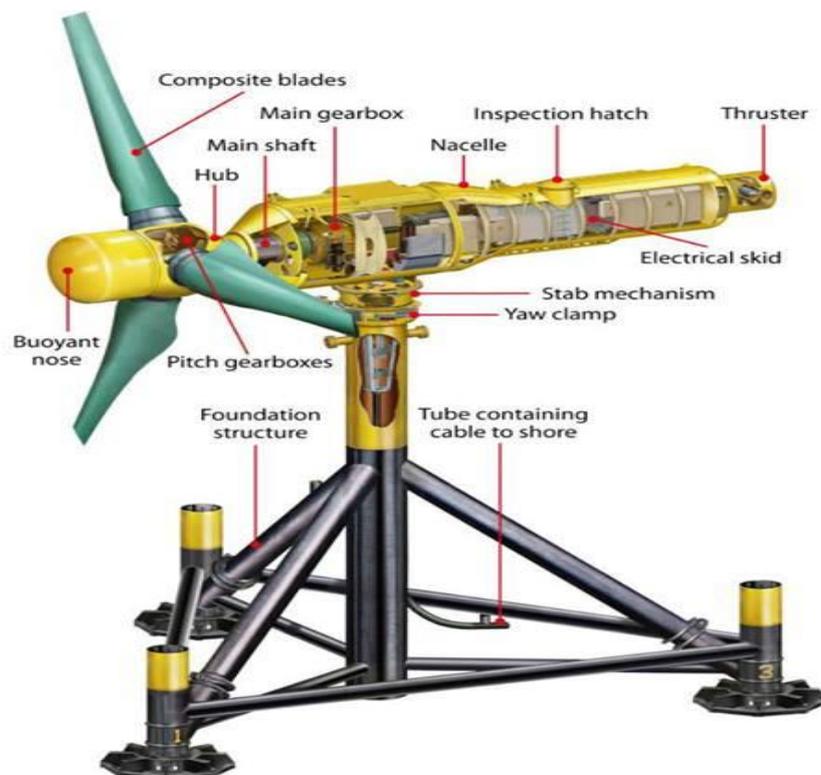


Figura I.10. *Partes de una turbina mareomotriz. Podemos apreciar entre las diferentes partes, la caja de engranajes y el generador.

I. Introducción

Las secciones transversales de las palas o perfiles hidrodinámicos se conocen como *hydrofoils*. Cada pala está diseñada a partir de uno o más tipos de *hydrofoils*, la eficiencia y el rendimiento del rotor dependerá de la geometría que se le dé a la pala. Generalmente las palas de menor espesor proporcionarán rendimientos más altos ofreciendo mejores resultados de elevación y arrastre, pero estructuralmente son más desafiantes, ya que en la raíz de la pala se generan momentos de flexión considerables debiendo aumentar los espesores en esta zona y distribuirlos proporcionalmente a lo largo de todo el tramo de pala dependiendo de la longitud de esta.

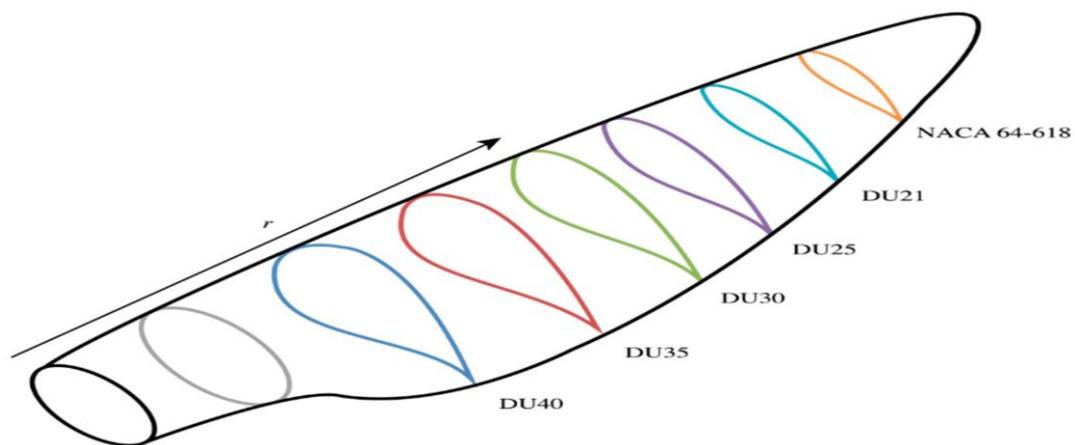


Figura I.11. Secciones transversales de una pala y evolución de perfiles.

I.2.2. Perfiles hidrodinámicos.

El principio de funcionamiento de una turbina mareomotriz es similar al de un aerogenerador, pero existen diferencias que condicionan el diseño de las palas como por ejemplo el que el agua sea 800 veces más densa que el aire y por consiguiente el número de Reynolds resultará ser mucho mayor. Aparecerán fuerzas de sustentación y arrastre considerables, así como momentos flectores en la raíz de pala. Por tanto, la elección de los perfiles hidrodinámicos a lo largo de todo el tramo de pala es de suma importancia ya que de ella dependerá el comportamiento del rotor de la turbina.

I. Introducción

I.2.2.1. Terminología de un perfil hidrodinámico.

Un perfil hidrodinámico es un cuerpo con un diseño determinado, el cual aprovechará al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando este se sitúa dentro de una corriente de agua, la distribución de las presiones produce sustentación y arrastre. Un perfil hidrodinámico se define como la sección transversal de una pala de la turbina mareomotriz. La variación en la geometría de un perfil producirá un cambio en sus prestaciones hidrodinámicas.

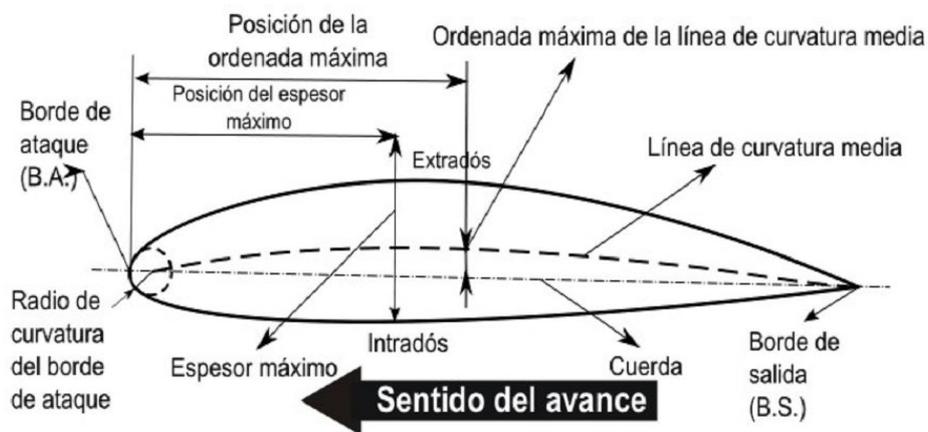


Figura I.12. ^{xiii}Terminología de las partes de un perfil hidrodinámico.

- Borde de ataque: Parte delantera del perfil de forma redondeada que recibe la corriente de agua. En el borde de ataque se produce la bifurcación de la corriente de agua hacia el intradós y el extradós.

- Borde de fuga: Llamado también "borde de salida". Corresponde al punto en el que las corrientes de agua provenientes del intradós y extradós confluyen y abandonan el perfil.

- Intradós: Término genérico que denota la parte inferior de una estructura. En un perfil de superficies corresponde a la parte inferior del mismo.

- Extradós: Llamado también "trasdós", es un término genérico que denota la parte exterior de una estructura. En un perfil de superficies corresponde a la parte superior del mismo.

I. Introducción

- Cuerda: Línea recta que une el borde de ataque con el borde de fuga.

- Región de ordenada máxima: Corresponde con la curvatura máxima, es un área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa de la curvatura máxima.

- Región de espesor máximo: Área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa del espesor máximo.

- Línea de curvatura media: Línea equidistante entre el extradós y en el intradós, define la curvatura del perfil de tal manera que si cae por encima de la cuerda tendríamos una curvatura positiva, si cae por debajo de la cuerda sería una curvatura negativa y si cae por encima y por debajo de la cuerda, se dice que el perfil posee una doble curvatura.

- Radio del borde de ataque: Define la forma del borde de ataque y es un valor que influye de forma importante en la pérdida. Geométricamente corresponde al radio de un círculo que debe de ser tangente tanto al intradós como al extradós y también al origen de la línea de curvatura media, de ahí que su centro este ubicado en la línea de curvatura máxima.

1.2.2.2. Tipos de perfiles.

Los perfiles NACA (Naca Advisory Committee of Aeronautics) desarrollados por el Comité Asesor Nacional de Aeronáutica, son la serie de perfiles más utilizada para el diseño de alas de aviones hasta turbinas eólicas o mareomotrices. Los perfiles NACA vienen definidos por una serie de números que definen ciertos parámetros importantes del perfil.

- Serie NACA de 4 dígitos: el primer dígito describe la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda. El segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque en 1/10 del porcentaje de la cuerda y los dos últimos dígitos describen el máximo espesor como porcentaje de la cuerda. Ejemplo: NACA 4418 contiene un espesor máximo del 18 % con una curvatura máxima del 4% y localizada al 40% detrás del borde de ataque del perfil.

I. Introducción

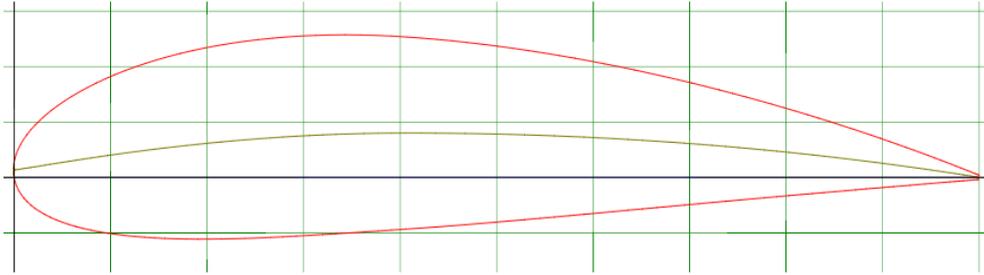


Figura I.13.^{xiii} NACA 4418.

- Serie NACA de 5 dígitos: La serie NACA de 5 dígitos usa la misma distribución de espesor como la serie de 4 dígitos pero la línea de curvatura media se define de diferente forma. El primer dígito se multiplica por 0,15 el cual nos dará el coeficiente de sustentación, los siguientes dos dígitos se dividen entre dos y nos proporcionan la posición de la curvatura máxima desde el borde de ataque como porcentaje de la cuerda y los dos últimos dígitos nos dan el espesor máximo expresado en porcentaje como el NACA de 4 dígitos. Ejemplo: NACA 24018 contiene un espesor máximo del 18%, una curvatura máxima de 0,2 desde el borde de ataque y un coeficiente de sustentación de 0,3.

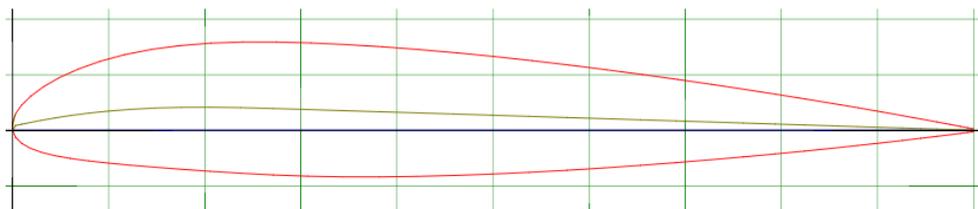


Figura I.14. ^{xiv}NACA 24018.

El rango de familias NACA 44XX es el más usado en el diseño de palas de turbinas mareomotrices, el de cinco dígitos es usado por completo en aviación. Actualmente se realizan numerosos estudios para diseñar nuevos perfiles, se trabaja con las series NACA de 6 dígitos obteniendo altos coeficientes de sustentación y bajos niveles de cavitación. En el presente trabajo de fin de grado nos centraremos en la serie de perfiles NACA 4 dígitos por ser hoy en día las series más utilizadas.

I. Introducción

I.2.3. Fundamentos teóricos del perfil hidrodinámico.

Un perfil hidrodinámico sumergido en un flujo de corriente es sometido a diversas fuerzas debido a la presión y a los cambios de velocidad y viscosidad del fluido. En este apartado se tratarán los aspectos teóricos básicos para el posterior cálculo y diseño de la pala de la hélice.

I.2.3.1. Teorema de Bernoulli.

Cuando el flujo de agua entra en contacto con el borde de la pala, se producen dos corrientes separadas, una irá por arriba y otra por abajo. Dada la geometría del perfil, la parte superior tiene mayor longitud que la parte inferior, ambas corrientes se encuentran en el borde de salida de la pala al mismo tiempo. Para que esto tenga lugar, el fluido de la parte superior debe circular a mayor velocidad que el de abajo, esto es posible debido a que existe una diferencia de presión sobre el perfil tal y como establece el Teorema de Bernoulli. A mayor velocidad tenemos menor presión y se produce succión hacia arriba creando una fuerza de sustentación. La suma de energías de un fluido debe ser constante a lo largo de su recorrido, es por ello que la disminución de presión debe de ser compensada con el aumento de velocidad y viceversa.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{BA}^2 + P_{BA} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{EX}^2 + P_{EX}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{BA}^2 + P_{BA} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{IN}^2 + P_{IN}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{EX}^2 + P_{EX} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{IN}^2 + P_{IN}$$

I. Introducción

La diferencia de presión es la causa de que el perfil posea una fuerza de sustentación que es perpendicular al flujo de agua.

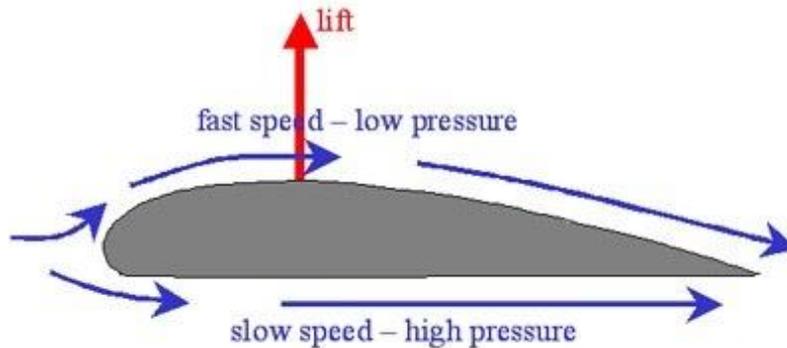


Figura I.15. ^{xv}La presión y la velocidad varían alrededor del perfil y la fuerza de sustentación es perpendicular al flujo del agua. $V_{SP}^2 \leq V_{SS}^2$ y $P_{SP} \geq P_{SS}$

I.2.3.2. Fuerzas sobre un perfil.

La masa de fluido que pasa a través del área de una sección transversal ficticia se ralentiza y pierde parte de su energía cinética. Este planteamiento nos permite distinguir entre una masa de agua sin perturbar con velocidad \vec{V}_1 correspondiente al área ficticia A_1 y otra masa de agua perturbada con velocidad \vec{V}_2 que corresponde aguas abajo con el área ficticia A_2 . Entre medias de las dos áreas se encuentra la hélice, el movimiento circular de las palas barre una sección transversal imaginaria de área A por la que circula una masa de agua con velocidad \vec{V} . Esa reducción de energía cinética del flujo de agua es aprovechada por el rotor a través de la hélice, si la hélice fuese capaz de captar toda la energía cinética del flujo de agua, la velocidad \vec{V}_2 sería igual a cero, y el flujo de agua en esa zona estaría en reposo. Esta explicación corresponde al modelo de Betz.

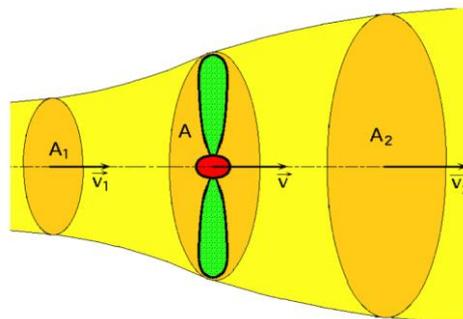


Figura I.16. ^{xvi}Modelo de Betz.

I. Introducción

El límite teórico o el coeficiente de Betz es una cifra expresada en porcentaje que nos proporciona el rendimiento máximo hidrodinámico (o el factor de potencia máxima) que ninguna máquina podrá superar.

La reducción de velocidad entre las tres áreas es debida a que la velocidad \vec{V}_1 cuando entra en contacto con el área A (área barrida por las palas de la hélice) se reducirá, la hélice girando induce una velocidad \vec{V}_x en la misma dirección pero en sentido opuesto a \vec{V}_1 .

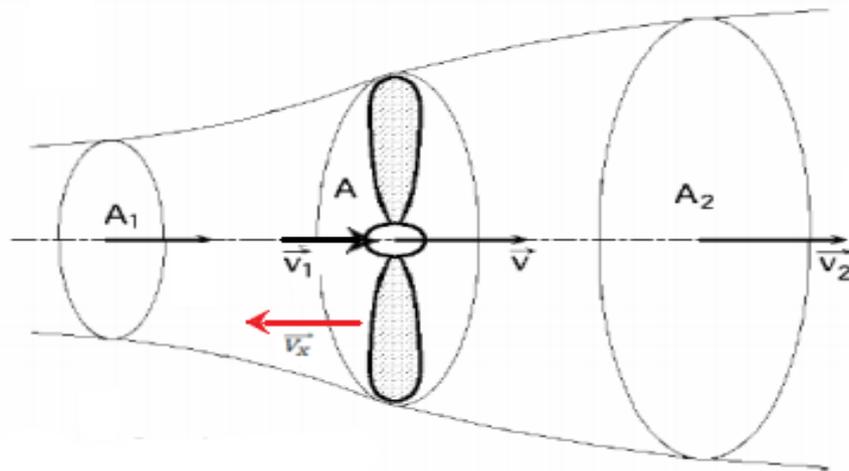


Figura I.17. ^{xviii}Velocidad inducida de flujo axial \vec{V}_x .

Es necesario introducir un factor de inducción axial (a) para dar explicación a como la hélice capta parte de la energía cinética de \vec{V}_1 , deduciéndose que

$$V_x = a \cdot V_1$$

De lo contrario se estaría dando por sentado de que toda la energía cinética de \vec{V}_1 sería captada por la hélice, lo que supondría un rendimiento del 100% y que la velocidad en $\vec{V}_2 = 0$. Dado que este planteamiento es imposible, la velocidad \vec{V} , que es la velocidad del agua que pasa a través de las palas de la hélice (área A) en función del factor de inducción de flujo axial, quedaría definida de la siguiente forma:

$$V = V_1 - V_x = V_1 - aV_1 ;$$

$$V = V_1 (1 - a)$$

I. Introducción

Al igual que se introduce un factor de inducción axial, se debe introducir otro factor de inducción, en este caso el factor de inducción de flujo tangencial (a'). La velocidad tangencial al movimiento circular de la pala, \vec{V}_b , viene dada por la expresión:

$$V_b = \omega \cdot r$$

Donde ω es la velocidad angular del rotor y r el radio desde el extremo de la pala a un elemento del perfil de esta. Si se introduce el factor de inducción de flujo tangencial a' obtenemos la velocidad tangencial neta que experimenta el elemento de pala, \vec{V}_t , la cual es:

$$V_t = (1 + a') \omega r$$

A partir de la velocidad, \vec{V} , axial al rotor y de la velocidad tangencial neta, V_t , se obtiene la velocidad resultante o aparente, \vec{W} :

$$W = \sqrt{V^2 + V_t^2}$$

A partir de la velocidad de flujo de agua libre (frente de agua sin perturbar), V_1 , y de la velocidad resultante, W , se van a generar diferentes fuerzas que actúan sobre la pala.

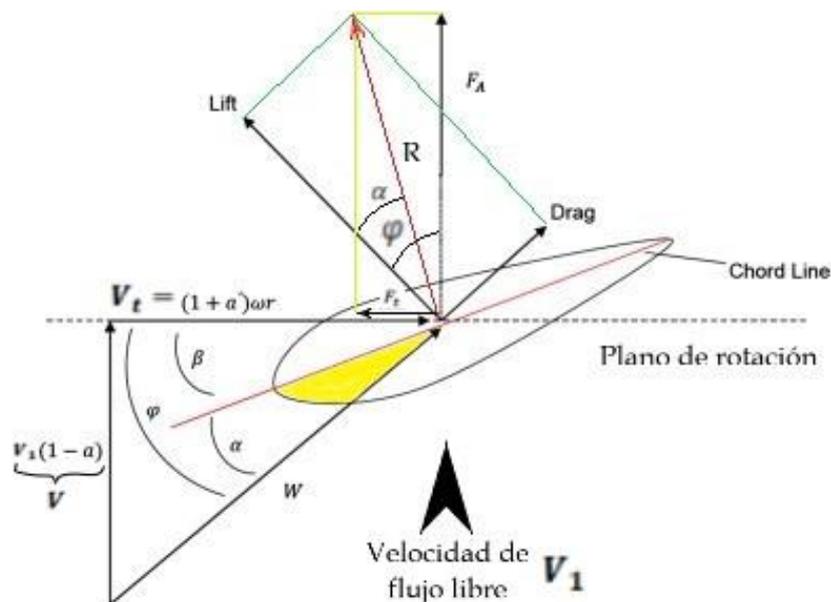


Figura I.18. Diagrama de vectores de velocidades y fuerzas en un elemento de la pala.

I. Introducción

La velocidad resultante actúa con un ángulo φ al plano de rotación de la pala:

$$\varphi = \alpha + \beta$$

Donde α es el ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad resultante del agua W (este ángulo representado en amarillo en la Figura I.17 es el ángulo de ataque), y β es el ángulo que forma la cuerda del perfil con el ángulo de rotación conocido como ángulo de anclaje.

La velocidad resultante o aparente \vec{W} da lugar a la fuerza de arrastre, D , la cual corresponde con una degradación de la energía y a la fuerza de sustentación L donde se produce succión, un empuje sobre la pala. La fuerza de arrastre D actúa paralela a la velocidad resultante, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho W^2 S$$

Mientras que la fuerza de sustentación lo hace perpendicular a la velocidad resultante y viene dada por la siguiente expresión:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho W^2 S$$

Donde S es el área de la superficie expuesta a la corriente de agua, ρ es la densidad del agua de mar y C_D y C_L los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente. El tipo de perfil que elijamos para el diseño de la pala se determinará a partir de los coeficientes de sustentación C_L y arrastre C_D . Un alto coeficiente de sustentación en ángulos de ataque altos es importante, por otra parte, un ángulo de ataque muy alto puede dejar a la pala en pérdida y con separación de flujo de agua, esto sería perjudicial ya que se perdería potencia. Por lo tanto es importante a la hora de definir un perfil un ángulo de ataque y una relación sustentación-resistencia C_L/C_D adecuada. Los coeficientes de sustentación y arrastre dependen del tipo de perfil, ángulo de ataque y del número de Reynolds.

Una vez conocidas las fuerzas hidrodinámicas de arrastre y sustentación se pueden conocer otras dos fuerzas de gran importancia como lo son la fuerza tangencial

I. Introducción

o de par F_t , responsable del giro de la hélice y la fuerza axial F_a , que es la fuerza de empuje del agua sobre el rotor. Para obtener estas fuerzas se deben de descomponer la fuerza de arrastre D y de sustentación L sobre el plano del rotor obteniendo así la fuerzas tangencial y axial. Las expresiones que se obtienen son las siguientes:

$$F_a = L \cos \varphi + D \sin \varphi$$

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

Como se puede observar en el diagrama de vectores de velocidades y fuerzas de la Figura I.17 aparece una fuerza R que es la resultante de las fuerzas aplicadas. R es producida por la velocidad relativa W y es perpendicular a la línea de cuerda y al mismo tiempo su longitud característica, su punto de aplicación es su centro hidrodinámico, el centro de empuje.

I. Introducción

I.3. MATERIALES.

I.3.1. Materiales compuestos.

Material compuesto es aquel que está formado por la combinación de diferentes componentes de tal manera que se consigue un efecto sinérgico en las propiedades finales, obteniéndose materiales con las prestaciones finales muy superiores a las de los componentes individuales. La finalidad de un material compuesto es combinar las características del elemento de refuerzo y del polímero termoestable.

I.3.1.1. La matriz.

Se encarga de actuar como soporte del elemento, en el caso que nos ocupa es de naturaleza termoestable. La matriz facilita el procesado de la estructura del material compuesto, al endurecer permite mantener la forma de la pieza del composite y una vez endurecida mantiene las fibras de refuerzo perfectamente alineadas, también protege las fibras frente la acción de agentes externos.

La resina más utilizada en la fabricación de palas de turbina mareomotriz es la resina epoxi en combinación con la fibra de vidrio, tiene una baja absorción a la humedad y una gran resistencia química.

La resina epoxi también combinada con la fibra de carbono, se emplea en la fabricación de palas de turbinas mareomotrices pero debido a su alto coste es poco utilizada. Posee una gran adherencia a los materiales y una excelente resistencia a esfuerzos, humedad y agentes químicos.

Principales matrices empleadas en la formación de materiales compuestos:

Cerámica ➔ Carburo de silicio, alúmina

Metálica ➔ Acero, aluminio

Polimérica

Termoestables ➔ **Epoxi**

Termoplásticas

Elastómeras

I. Introducción

El proceso de curado de un material termoestable como es el caso de la resina epoxi, es un proceso exotérmico que implica el paso de un material líquido a un material sólido. Las técnicas empleadas para llevar a cabo un seguimiento del proceso de curado de un termoestable son muchas (técnicas de calorimetría de barrido, reometría plato-plato, dieléctricas) pero en el caso que nos ocupa y tal y como se explicará en el apartado III.7 de fabricación, se realizará a temperatura ambiente.

Las matrices termoestables se obtienen mediante procesos de reticulación de materias en forma de resinas líquidas, la reacción de reticulación se ve activada por la presencia de agentes reguladores y calor o presión.

Los polímeros termoestables se pueden obtener mediante diversos procesos de polimerización:

- Adición (epoxi-EP)
- Condensación (fenol-formaldehido-PF)
- Procesos combinados (poliéster insaturado -UP)

La formulación básica de una resina termoestable está formada por la resina propiamente dicha y el endurecedor, que es el componente encargado de la reacción de entrecruzamiento en la resina base. Existen también otros componentes que se emplean en proporciones relativamente bajas pero que desempeñan un papel decisivo en el material:

-Diluyentes reactivos. Empleados para reducir la viscosidad y facilitar el procesado.

-Iniciadores. Desencadenan la reacción química de entrecruzamiento.

-Aceleradores/catalizadores. Controlan la velocidad de reacción para que se produzca de forma deseada.

-Inhibidores. Impiden que se produzca la reacción química entre determinados componentes.

I. Introducción

I.3.1.2. El elemento de refuerzo.

Actúa como elemento resistente y se encarga de soportar el esfuerzo mecánico al aportar excelentes propiedades mecánicas al compuesto, no obstante, presentan dificultades para ser procesadas en forma de elementos de ingeniería. Dentro de los elementos de refuerzo destacan las fibras de vidrio con buena resistencia a la tracción, corrosión, de bajo peso, costo y baja rigidez, y las fibras de carbono con una alta resistencia a la tensión en relación con el peso, poseen alta resistencia a la fatiga, baja densidad, resistencia a impactos y alto coste.

Las fibras se clasifican en dos grandes grupos atendiendo a la naturaleza de su estructura:

Tabla I.1. Clasificación de las fibras según su naturaleza.

Fibras	Orgánicas	Carbono, polietileno, p-aramida, m-aramida, LCP
	Inorgánicas	Vidrio, boro, carburo de silicio, cerámicas, metálicas

Características de los materiales compuestos:

Elevada resistencia mecánica frente a esfuerzos de tracción y flexión.

Elevada ligereza.

Alta estabilidad dimensional.

Elevada resistencia a los agentes químicos y atmosféricos.

Posibilidad de aislamiento térmico, acústico y eléctrico.

Baja transmisión de vibraciones. Buen comportamiento a fatiga.

Elevada resistencia térmica y buen comportamiento a la llama.

I. Introducción

I.3.1.3. Caracterización del comportamiento mecánico del compuesto.

Cuando se trabaja con materiales compuestos se consigue un efecto sinérgico. En este apartado se tratará de explicar cómo funciona tanto por separado como conjuntamente el elemento de refuerzo y la matriz.

La matriz por si sola tiene un módulo de unos 4500 MPa , si sometemos a la matriz por si sola a una tensión de tracción σ_1 , esta se deformará ε_1 . Si en cambio la sometemos a una tensión a tracción σ_2 , la matriz por su bajo módulo no podrá soportar y el resultado es que presentará rotura.

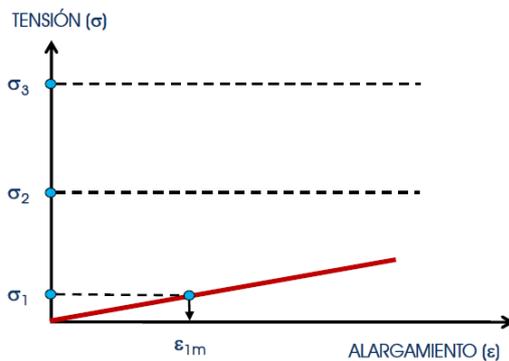


Figura I.19. ^{xviii}Caracterización del comportamiento mecánico de la matriz.

El elemento de refuerzo como se ha explicado anteriormente soporta los esfuerzos mecánicos trabajando excelentemente a tracción por su alto módulo. Sometido el elemento de refuerzo a las mismas tensiones σ_1 y σ_2 que la matriz, observamos como las deformaciones obtenidas son mínimas.

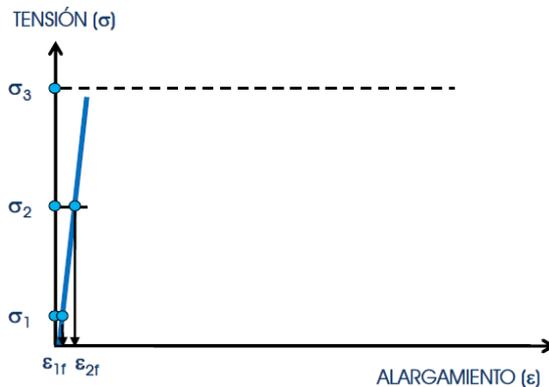


Figura I.20. ^{xix}Caracterización del comportamiento mecánico de la fibra.

I. Introducción

A pesar de que el elemento de refuerzo es el que aporta elevadas propiedades mecánicas, el compuesto requiere el empleo de una matriz para poder procesar el material para aplicaciones en ingeniería. La interacción entre la matriz y la fibra debe de ser alta para conseguir que trabajen en condiciones de isodeformación, esta interacción se basa en los fenómenos de adhesión entre superficies. La adhesión se basa en la interacción entre superficies de la fibra y la matriz, cuanto más rugosas sean las superficies mejor será la adhesión.

Una vez formado el compuesto si se le aplican las tensiones σ_1 y σ_2 se comprueba que la matriz y la fibra trabajan conjuntamente consiguiendo un efecto sinérgico. Con interacción la adhesión es buena y la deformación es conjunta, toda la tensión que debería de soportar por separado la matriz, la soporta la fibra, son tensiones que se transmiten a cortadura desde la matriz a la fibra. Si se superase la tensión de rotura máxima que puede soportar la fibra σ_3 , esta rompería primero, transmitiendo los esfuerzos a la matriz, la cual rompería súbitamente.

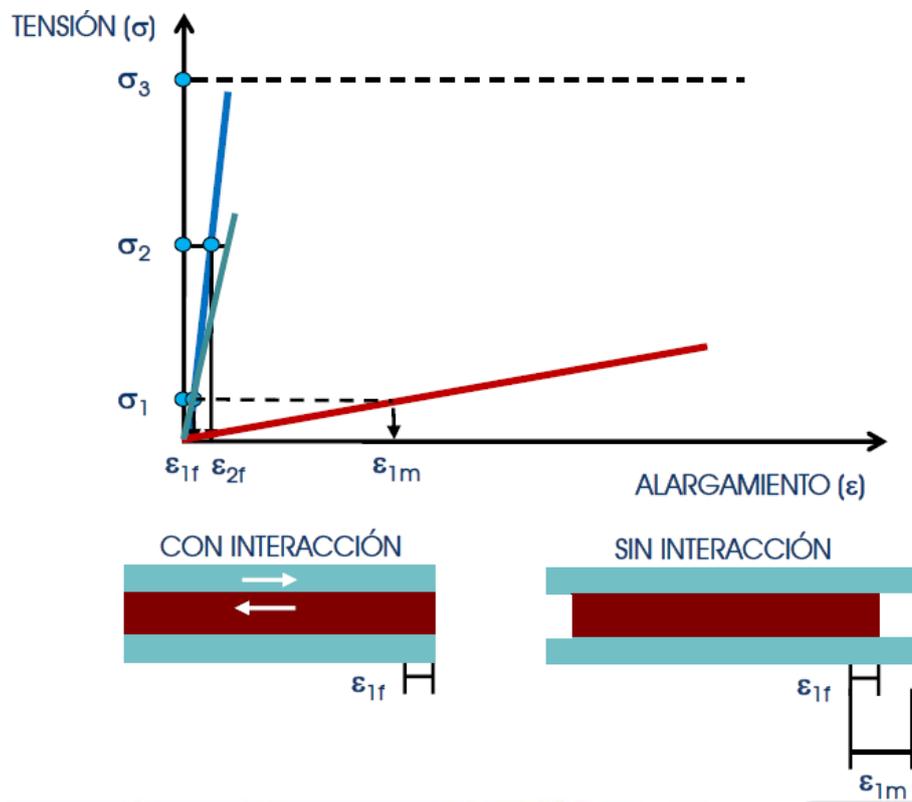


Figura I.21. Caracterización del comportamiento mecánico del compuesto.

II. OBJETIVOS

OBJETIVOS

II. Objetivos

II.1. OBJETIVO GENERAL.

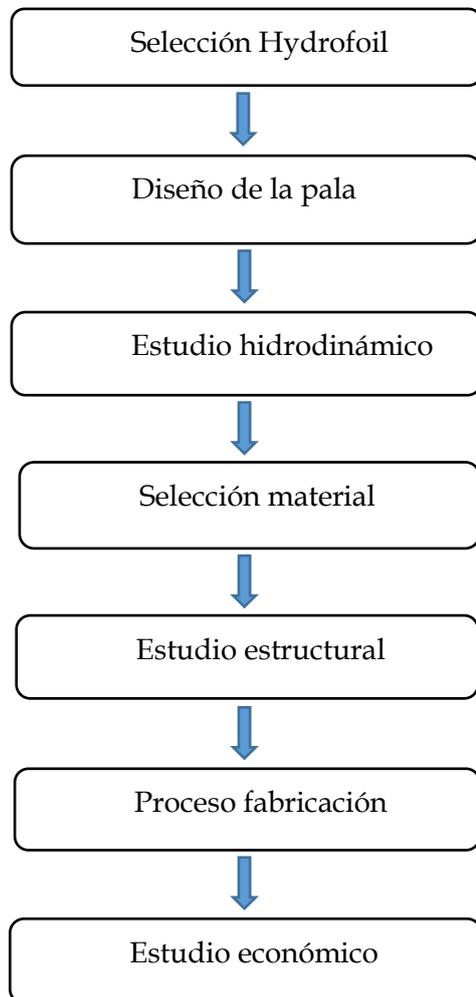
El objetivo del presente proyecto es el desarrollo de la pala de una turbina de energía mareomotriz. La pala se fabricará con materiales compuestos, se empleará para su diseño un software de CAD con el que se abordará un estudio hidrodinámico y otro estructural aplicando los materiales seleccionados, también se contemplará su proceso de fabricación así como un estudio económico.

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

- 1.- Selección del hydrofoil o perfil hidrodinámico más adecuado.
- 2.- Diseño de la pala con el programa SolidWorks considerando unos parámetros de entrada como velocidad del agua, presión de trabajo y viscosidad del fluido.
- 3.- Estudio hidrodinámico con el que obtendremos las fuerzas de componente axial y tangencial que serán las presiones de trabajo en SolidWorks.
- 4.- Selección del material.
- 5.- Estudio estructural en el que se introducirán las fuerzas del estudio hidrodinámico para obtener las deformaciones producidas en la pala con la ayuda de herramientas basadas en el método de elementos finitos.
- 6.- Proceso de fabricación.
- 7.- Estudio de viabilidad económica.

II. Objetivos

Diagrama de flujo de los objetivos particulares.



III. DESARROLLO PROYECTO

DESARROLLO PROYECTO

III. Desarrollo proyecto

III.1. NORMATIVA APLICABLE.

En España la energía marina está regulada por dos reales decretos. El RD 661/2007 de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, y concretamente en su artículo 2, categoría b, grupo b3, donde hace referencia a las instalaciones que únicamente utilicen como energía primaria la geotérmica, la de las olas, la de las mareas, la de rocas calientes y secas, la oceanotérmica y la energía de las corrientes marinas.

El otro ordenamiento regulatorio es el RD 1028/2007 por el cual existe una regulación de los procedimientos, condiciones y criterios que han de regir para la obtención de las autorizaciones y concesiones administrativas para la construcción y ampliación de las instalaciones de generación de electricidad que se encuentran ubicadas físicamente en el mar territorial.

En cuanto a la legislación de la UE la Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo Europeo del 27 de septiembre de 2001 relativo a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad.

III. Desarrollo proyecto

III.2. DISEÑO INICIAL PROTOTIPO.

El diseño consiste en la obtención de un modelo hidrodinámico y otro estructural, para el modelo hidrodinámico serán necesarios unos parámetros de entrada. Las distintas fuerzas tangenciales y axiales que actuarán sobre la pala son provistas por el modelo hidrodinámico y se utilizarán como entrada para el modelo estructural, el cual proporcionará una distribución de las deformaciones a lo largo del tramo de la pala en función de los materiales que se hayan seleccionado. La finalidad es captar la máxima potencia de las corrientes marinas con un mínimo coste. Se realizará una simulación hidrodinámica y otra estructural con la ayuda de un programa de elementos finitos, concretamente el programa SolidWorks.

III.2.1. Selección del tipo de perfil hidrodinámico.

La búsqueda del perfil se hace a través de la página web www.airfoiltools.com. Contiene una base de datos con los parámetros, en este caso, aerodinámicos y geométricos. La elección del perfil tiene suma importancia ya que de él dependerá el rendimiento de la pala, para las turbinas mareomotrices los perfiles más utilizados son los de la familia NACA, concretamente los correspondientes a las series de cuatro cifras NACA 44XX.

Para el diseño de la pala de la hélice de la turbina mareomotriz del presente trabajo de fin grado se empleará el perfil NACA 4418 utilizado en la actualidad en numerosas turbinas, descrito en el apartado I.2.2.2 el cual se mantendrá a lo largo de todo el tramo de pala.

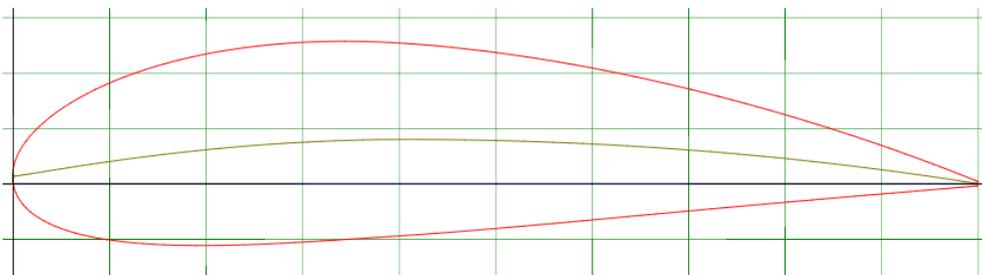


Figura I.22. NACA 4418.

III. Desarrollo proyecto

III.2.2. Selección de parámetros hidrodinámicos y obtención de coeficientes hidrodinámicos.

Para el presente proyecto se han tenido en cuenta parámetros hidrodinámicos iniciales tales como velocidad media de las corrientes marinas, presión a la que se encuentra trabajando la turbina mareomotriz debida a la profundidad, viscosidad cinemática del agua de mar, densidad del agua marina, número de Reynolds.

A partir de los parámetros iniciales podremos obtener los distintos coeficientes hidrodinámicos de sustentación y arrastre con la ayuda de la base de datos disponible en www.airfoiltools.com, estos coeficientes hidrodinámicos nos permitirán conocer cuando la pala entra en pérdida en función del ángulo de ataque, así como la eficiencia hidrodinámica máxima. Los coeficientes de sustentación y arrastre dependen del tipo de perfil, ángulo de ataque y del número de Reynolds.

Las velocidades de las corrientes marinas pueden oscilar entre los 0,6 m/s y los 4,5 m/s, se ha tomado en cuenta una velocidad media de 2,4 m/s y una profundidad media de trabajo de 30 m con un número de Reynolds de 1.000.000. Estos parámetros iniciales son los más extendidos en las distintas ubicaciones geográficas de las granjas de energía mareomotriz junto con el perfil NACA 4418 empleado en el diseño de las palas de la hélice.

Tabla III.1. Tabla con los distintos parámetros iniciales para un perfil NACA 4418

Parámetro	Valor
Velocidad del agua	2,6 m/s
Profundidad	30 m
Número de Reynolds	1.000.000
Densidad del agua	1025 Kg/m ³
Viscosidad del agua	0,0013155 Pa s

III. Desarrollo proyecto

A continuación se representan los coeficientes hidrodinámicos en dos gráficas en función del ángulo de ataque.

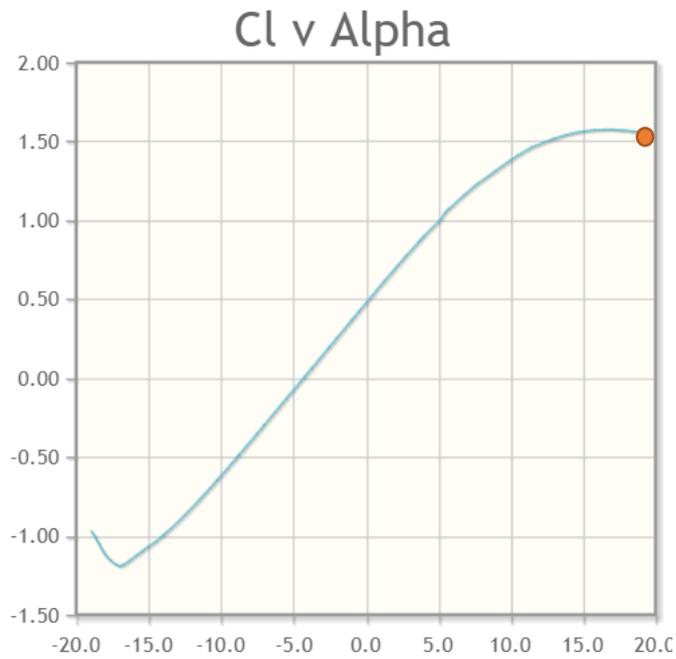


Figura III.23. Cl vs ángulo de ataque del perfil NACA 4418 para un Reynolds de 1.000.000

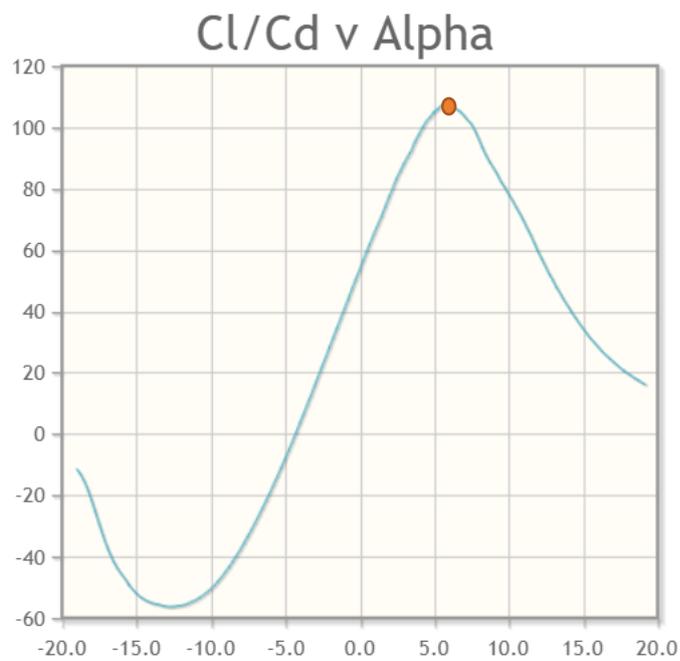


Figura III.24. Cl/Cd vs ángulo de ataque del perfil NACA 4418 para un Reynolds de 1.000.000

III. Desarrollo proyecto

La primera gráfica nos indica cuando comienza a entrar en pérdida la pala en función de su ángulo de ataque, alcanza el coeficiente de sustentación máximo en los $16,75^\circ$ con un valor de 1,5748, a partir de aquí la pala entra en pérdida.

La segunda gráfica indica la eficiencia hidrodinámica máxima y nos proporciona la torsión adecuada a lo largo de la longitud de la pala, para ello se debe tomar el ángulo de ataque óptimo, que será aquel que haga máximo el coeficiente C_L/C_D . Presenta un C_L/C_D máximo de 107,46 a los $5,75^\circ$.

Tabla III.2. Criterios hidrodinámicos óptimos.

Ángulo ataque optimo (α)	C_L/C_D Máximos	C_L	C_D
$5,75^\circ$	107,46	1,0714	0,00997

III.2.3. Cálculo de la geometría de la pala.

Para realizar el diseño de la pala se necesitan tres parámetros geométricos de diseño: la distancia del elemento al origen que corresponderá con el radio de la pala en ese momento (r), la longitud de la cuerda L_c , y el ángulo de torsión (θ).

Tabla III.3. Parámetros geométricos de diseño de la pala.

r (m)	Cuerda (m)	Ángulo torsión (grados)
2	1,65	21
3	1,62	16
4	1,52	12
5	1,36	9
6	1,22	7
7	1,08	5
8	0,96	4
9	0,9	3
10	0,8	2
11	0,75	1
12	0,68	0,1

III. Desarrollo proyecto

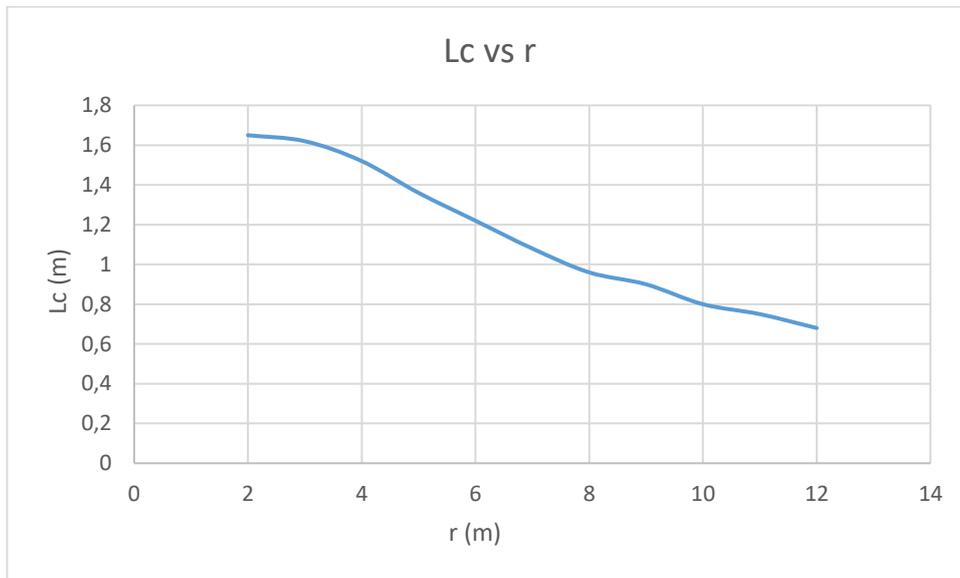


Figura III.25. Distribución de la longitud de cuerda (L_c)

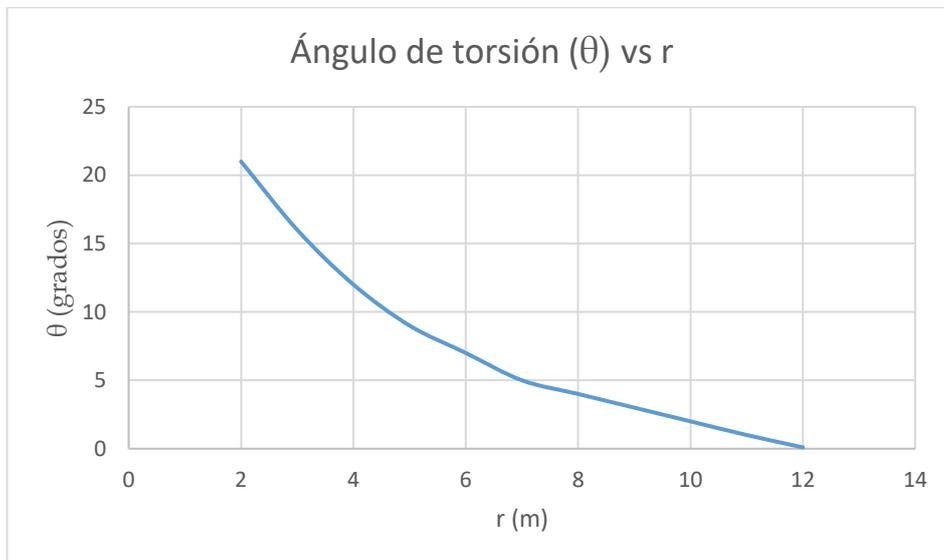


Figura III.26. Distribución del ángulo de torsión (θ)

III. Desarrollo proyecto

III.2.4. Diseño de la pala en CAD.

Una vez conocido el perfil hidrodinámico que se va a utilizar en el diseño de la pala será necesario conocer las coordenadas geométricas del mismo, estas se obtienen de la base de datos de la web www.airfoiltools.com. Para el diseño de la pala se han usado once perfiles NACA 4418 cada uno de ellos con sus coordenadas geométricas correspondientes en función de la longitud de la cuerda. En el anexo IV.2.1 se muestran las coordenadas de los once perfiles.

Una vez conocidas las coordenadas de los perfiles en formato de texto se procede a diseñar la pala con el programa SolidWorks. Primero se crearán el número de planos correspondientes al número de perfiles, partiendo de un plano de referencia en vista de alzado, el resto de planos estarán a la distancia correspondiente que viene dada por el parámetro (r) de la tabla III.3.

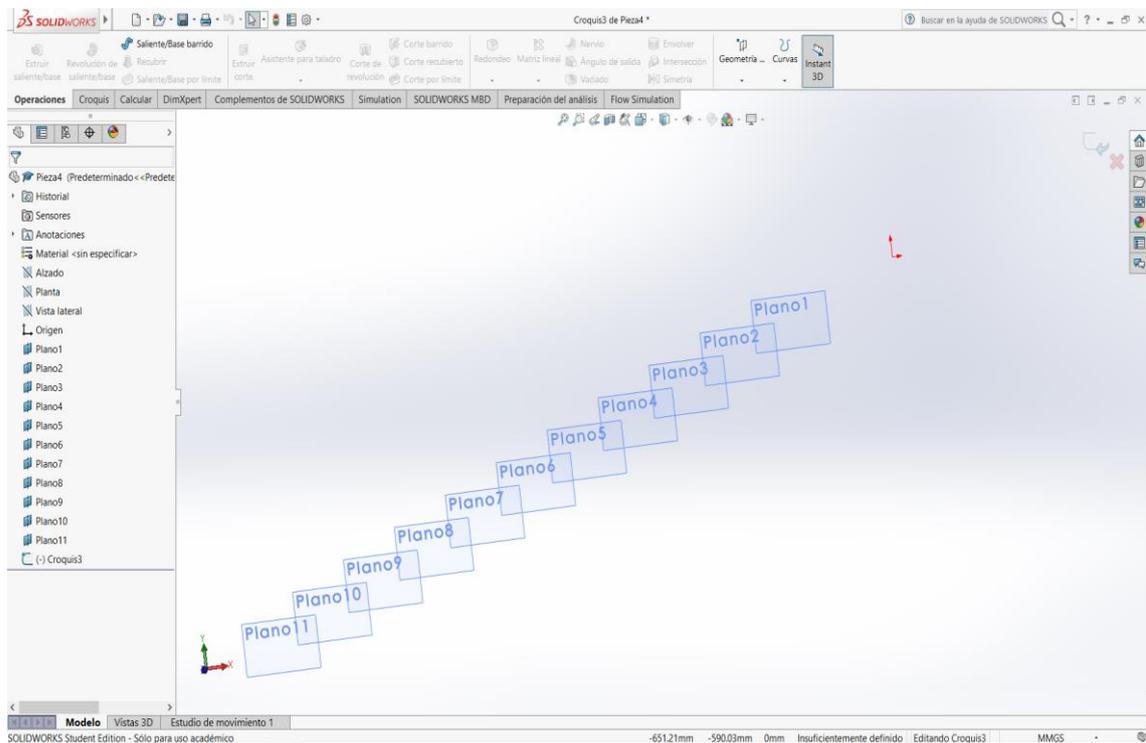


Figura III.27. Distintos planos empleados en el diseño de la pala.

III. Desarrollo proyecto

A continuación, se procede a exportar las coordenadas geométricas del perfil a SolidWorks. En cada plano se debe ubicar un perfil para introducir las coordenadas, para ello se debe seleccionar el plano, carpeta “operaciones” y “curvas”, dentro de curvas seleccionaremos la opción “curva por puntos XYZ”.

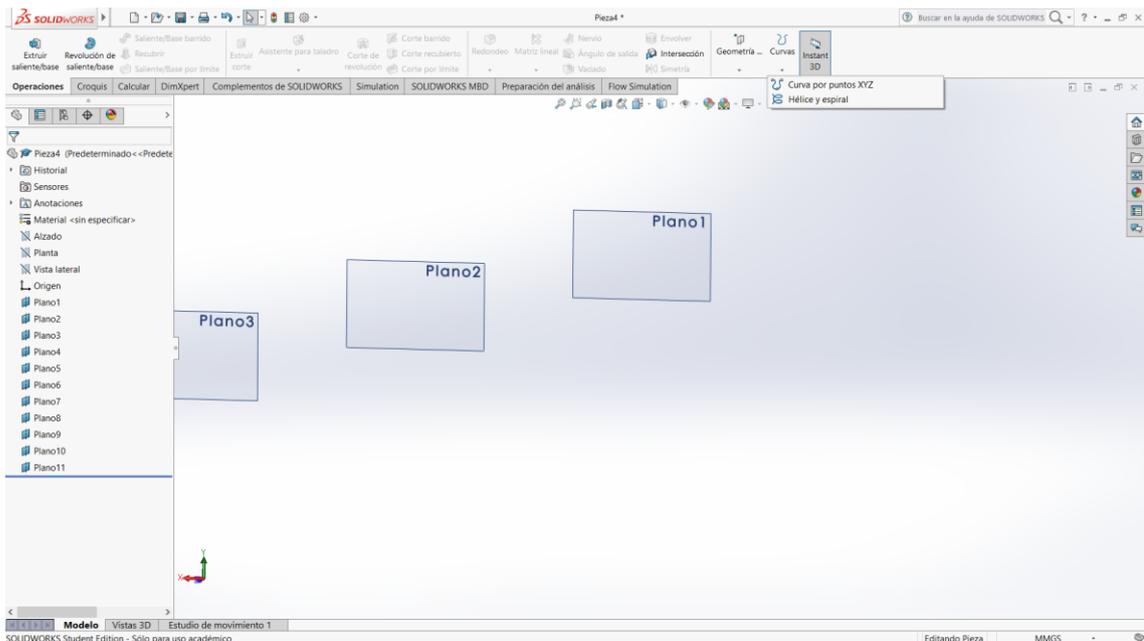


Figura III.28. Comando curva por puntos XYZ.

Nos aparecerá un cuadro donde deberemos introducir las coordenadas del perfil en formato .txt.

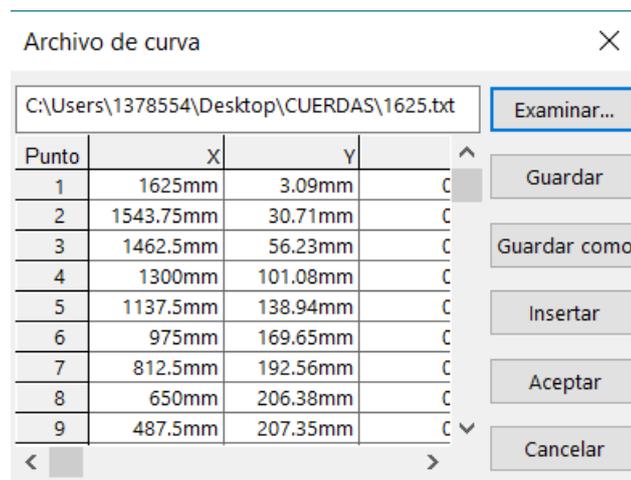


Figura III.29. Introducción de coordenadas de perfil.

III. Desarrollo proyecto

Seleccionamos el plano al que pertenecen las coordenadas introducidas y creamos un croquis en el que trasladaremos la curva introducida por medio del comando “convertir entidades”.

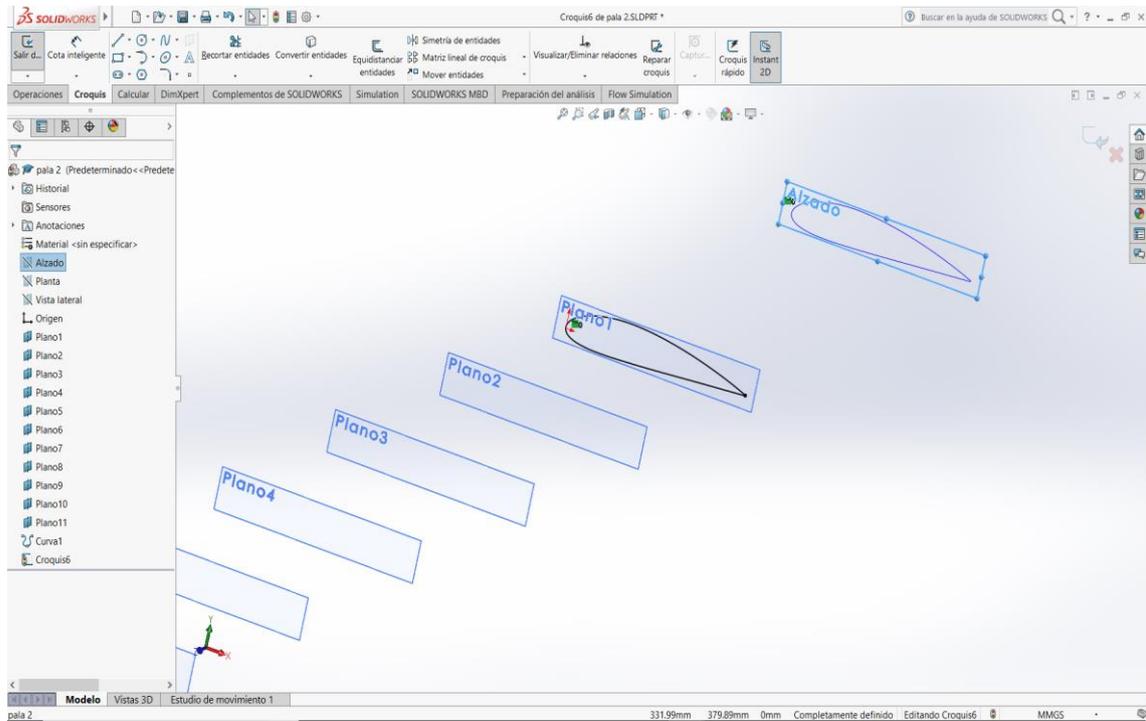


Figura III.30. Convertir entidades.

Seleccionando el plano correspondiente realizamos una línea horizontal constructiva que tendrá una longitud de $\frac{1}{3}$ de la longitud de la cuerda.

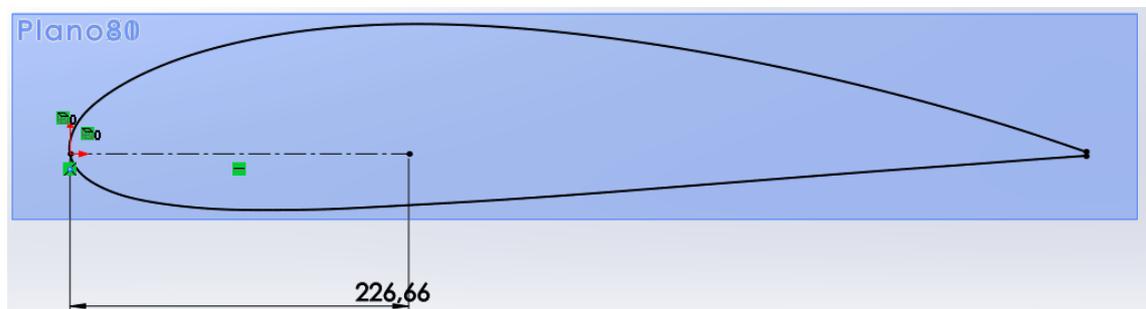


Figura III.31. Construcción de línea constructiva de $\frac{1}{3}$ de la longitud de la cuerda.

III. Desarrollo proyecto

A continuación, con el comando “mover entidades” trasladaremos el perfil horizontalmente al eje de giro para posteriormente darle el ángulo de torsión adecuado.

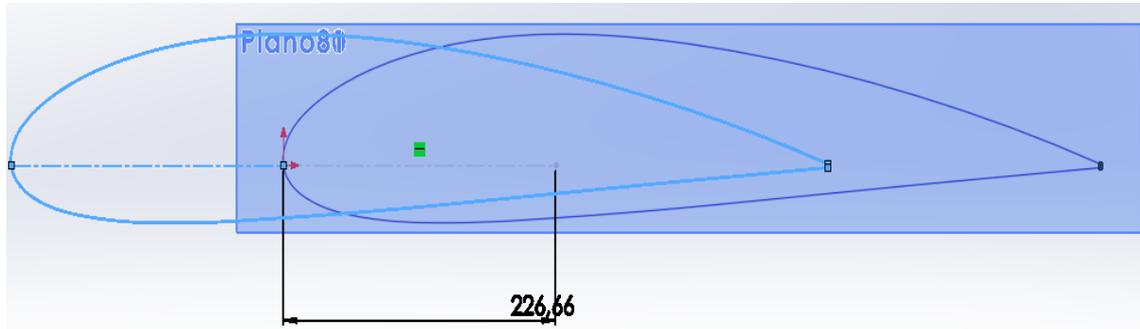


Figura III.32. Mover entidades.

Se gira el perfil el ángulo θ correspondiente con el comando “girar entidades”.

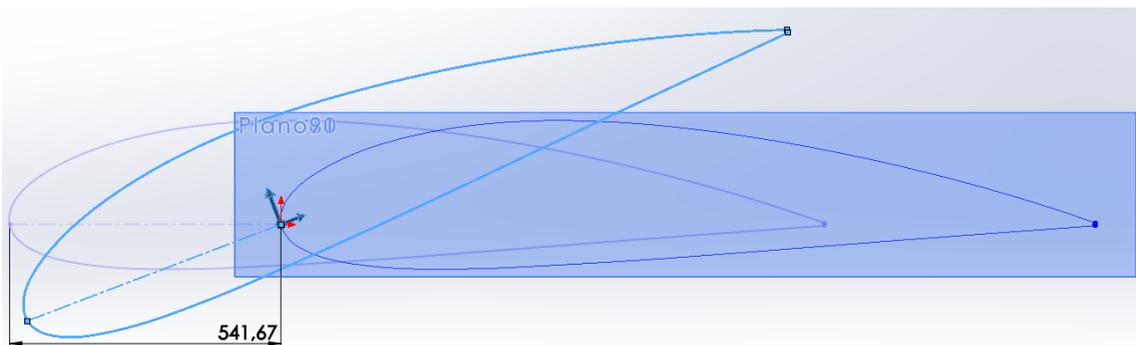


Figura III.33. Girar entidades.

Llegados a este punto se debe “salir del croquis” y en el plano de alzado se eliminará la curva existente. Se repetirán los pasos anteriores con cada uno de los planos restantes.

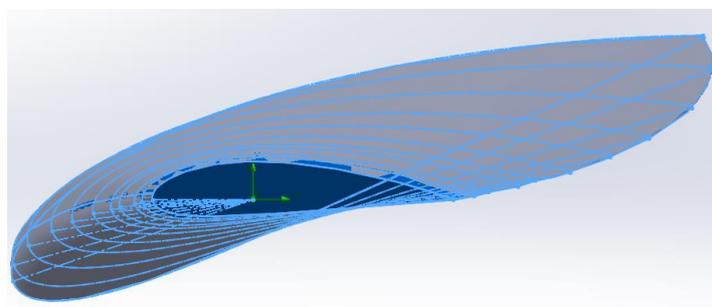


Figura III.34. Secuencia de perfiles girados en sus correspondientes ángulos de torsión.

III. Desarrollo proyecto

Con el comando “recubrir” seleccionando un perfil tras otro el programa logra crear una sola pieza.

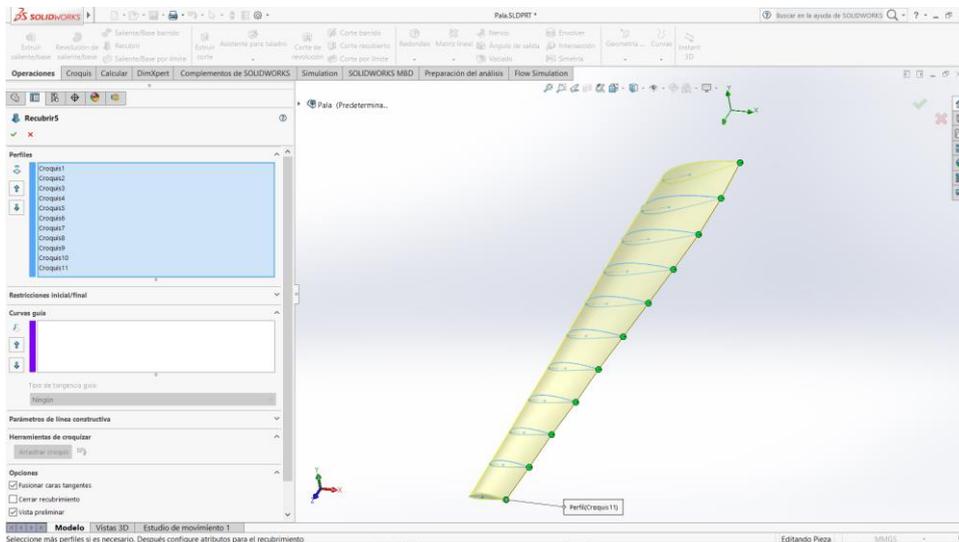


Figura III.35. Operación de recubrir.

Por último, creamos una superficie con el comando “equidistanciar”, la finalidad es crear una superficie en la que se introducirán las propiedades mecánicas del material compuesto quedando la operación “recubrir” creada anteriormente como el núcleo de la estructura sándwich. La nueva superficie se equidistancia a 0 mm.

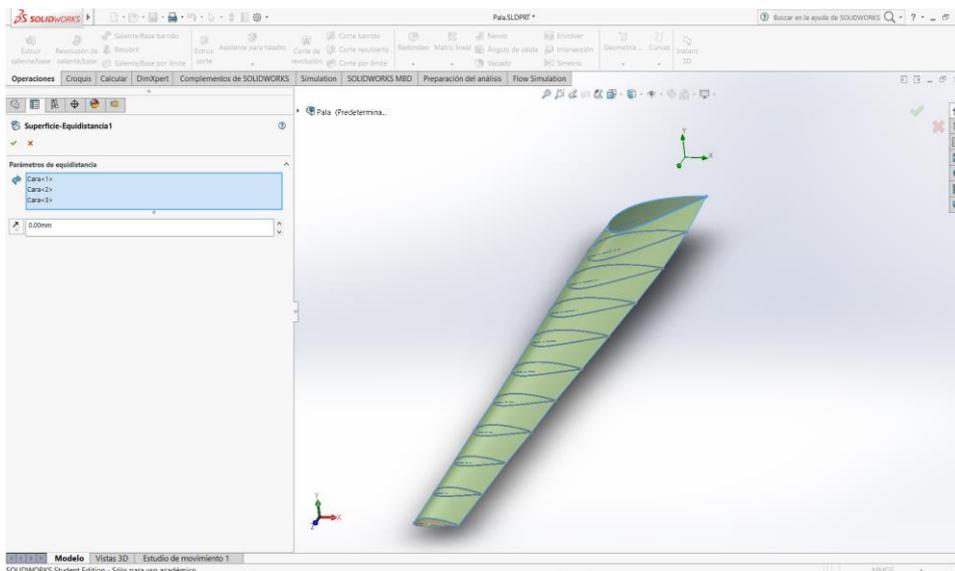


Figura III.36. Operación de equidistanciar.

III. Desarrollo proyecto

Finalmente, la pieza queda completamente diseñada para posteriormente someterla a un estudio hidrodinámico y estructural.

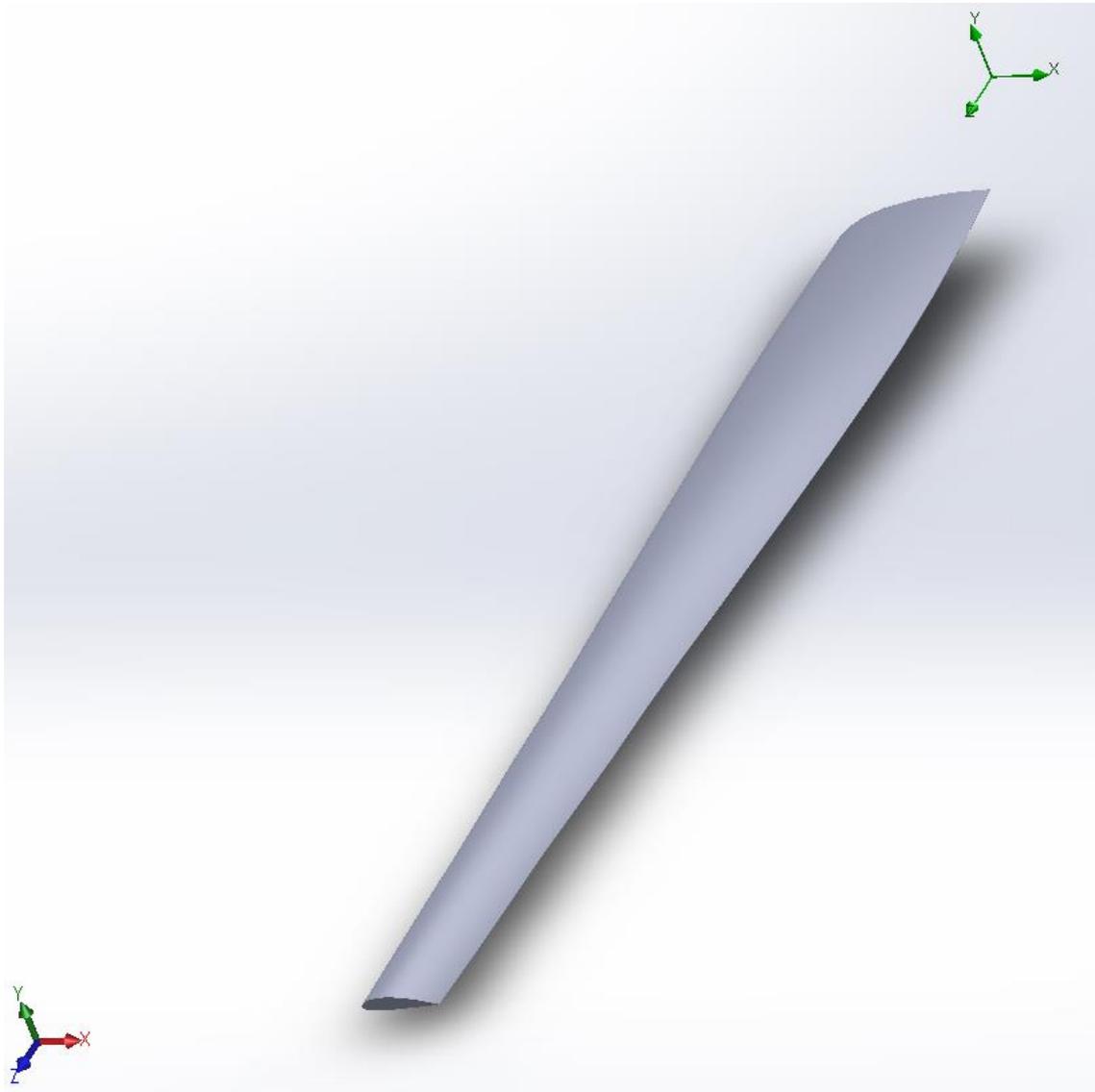


Figura III.37. Pala completamente finalizada.

III. Desarrollo proyecto

III.3. ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA PALA.

Se realizará un estudio hidrodinámico de la pala en el que se simularán unas condiciones de velocidad de corriente de agua y presión debida a la profundidad en la que opera la turbina, con la finalidad de conocer las cargas que se aplicarán a los materiales seleccionados en la construcción de la pala.

Con la ayuda del complemento “Flow Simulation” del programa SolidWorks recrearemos las condiciones de trabajo de la pala. A continuación, se detallarán los pasos a seguir para realizar la simulación.

Dentro de la carpeta “Flow Simulation” accionamos el comando “Wizard” para poder crear el ensayo que se va a realizar.

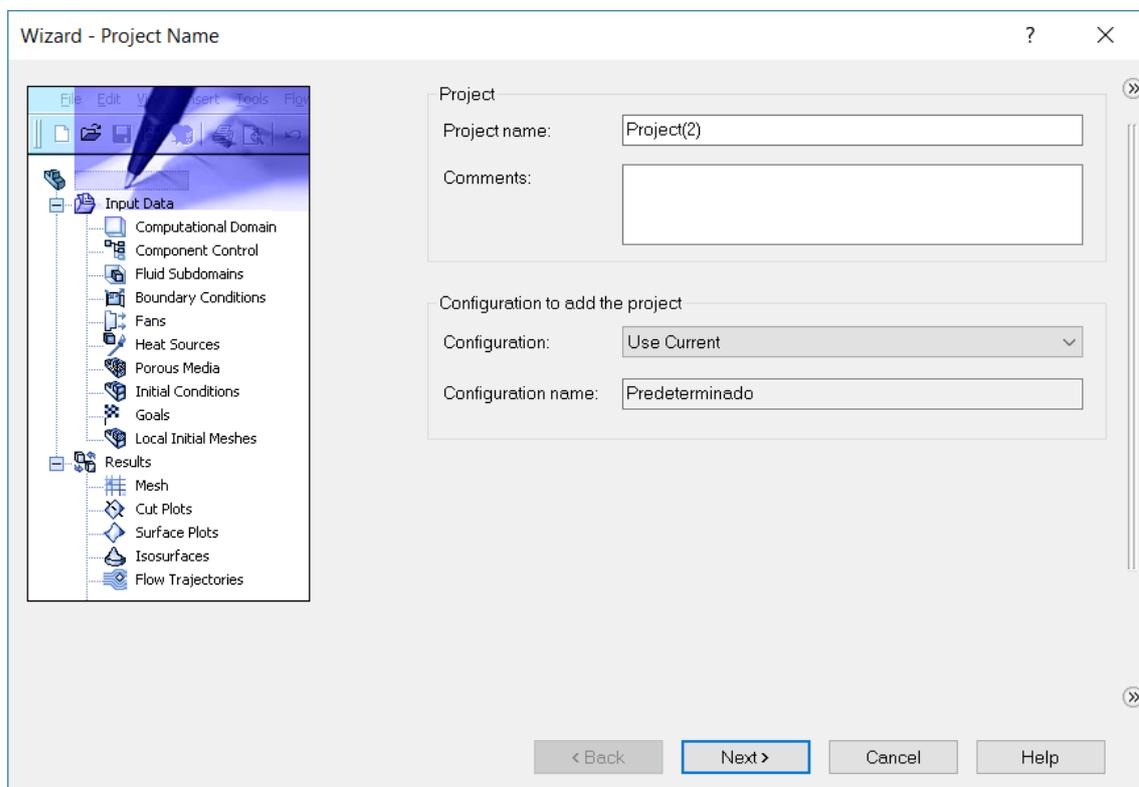


Figura III.38. Comando “wizard”, primero se le da nombre a la simulación.

III. Desarrollo proyecto

Seleccionamos el tipo de unidades con las que queremos realizar el ensayo, las unidades estarán en el sistema internacional (SI).

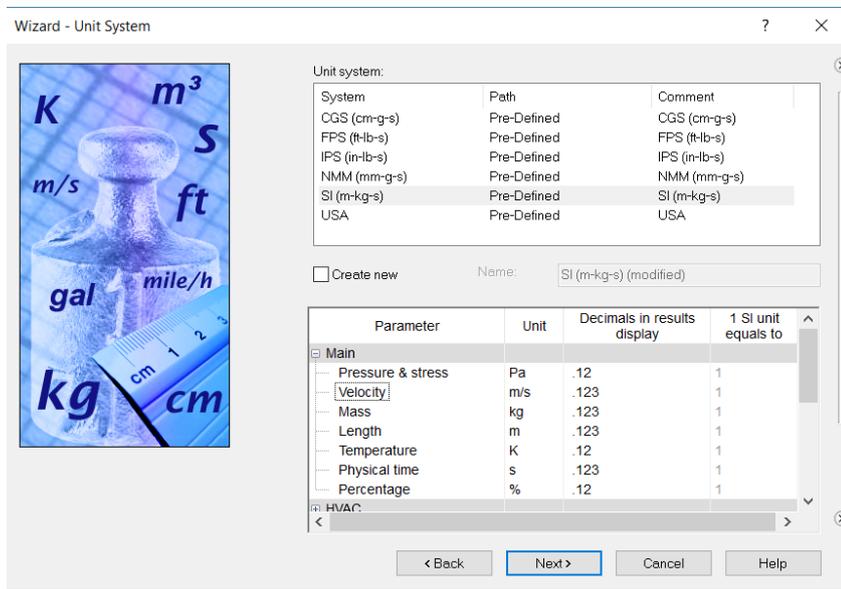


Figura III.39. Selección de las unidades en sistema internacional (SI).

Seleccionamos el tipo de análisis, en este caso externo ya que el agua envuelve a la pala, también elegimos la dirección del agua.

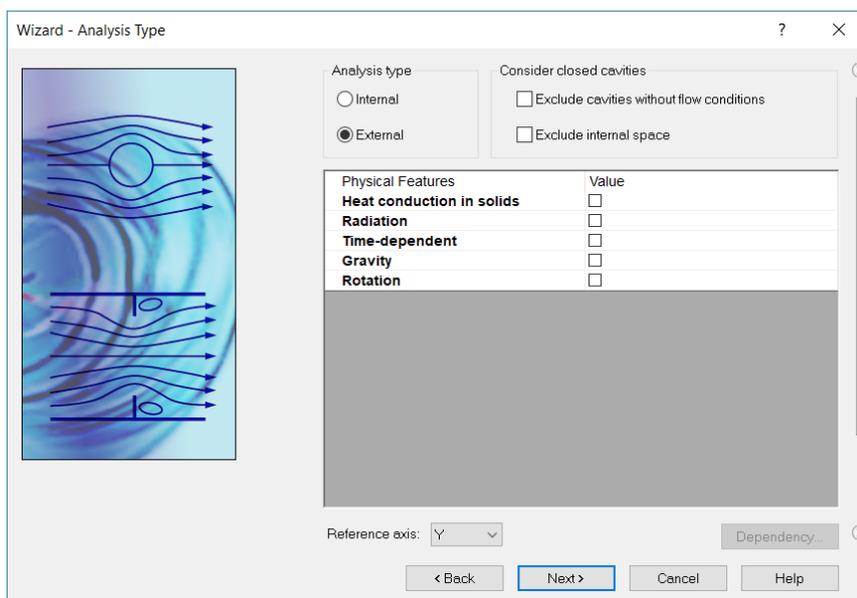


Figura III.40. Selección del tipo de análisis y la dirección del agua.

III. Desarrollo proyecto

A continuación, se selecciona el tipo de fluido que vamos a emplear en nuestra simulación “Water” y las condiciones del fluido “laminar y turbulento” ya que son las que más se asemejan a la realidad.

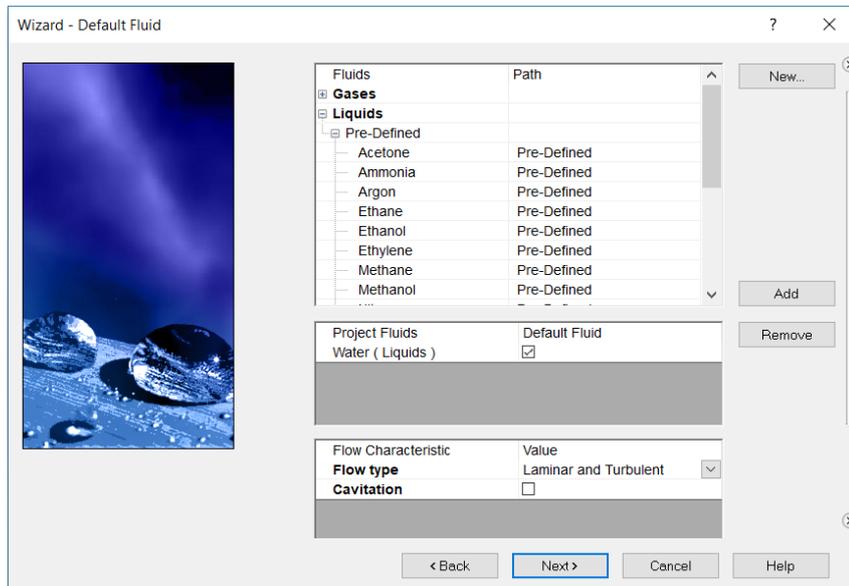


Figura III.41. Selección del fluido y su régimen.

En la siguiente ventana no será necesario definir ningún parámetro para la simulación de la pala, por lo tanto no se selecciona nada.

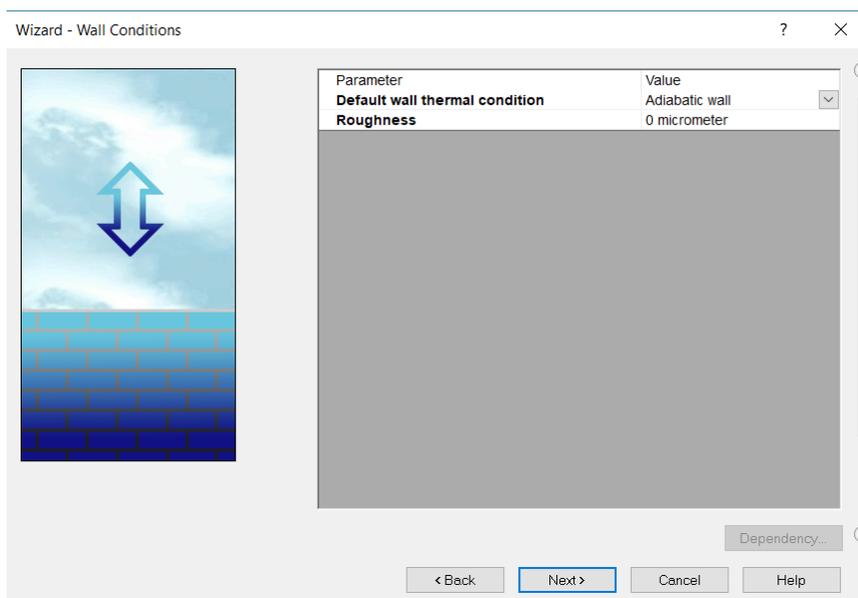


Figura III.42. No influyen en el estudio estos parámetros.

III. Desarrollo proyecto

En la última ventana se deberá de indicar la presión, en este caso la turbina estará sumergida a 30 m lo que equivale a 4 atm o 405300 Pa y la velocidad del agua estimada en 2,4 m/s. La temperatura la dejamos por defecto en 293,2 K (20 grados).

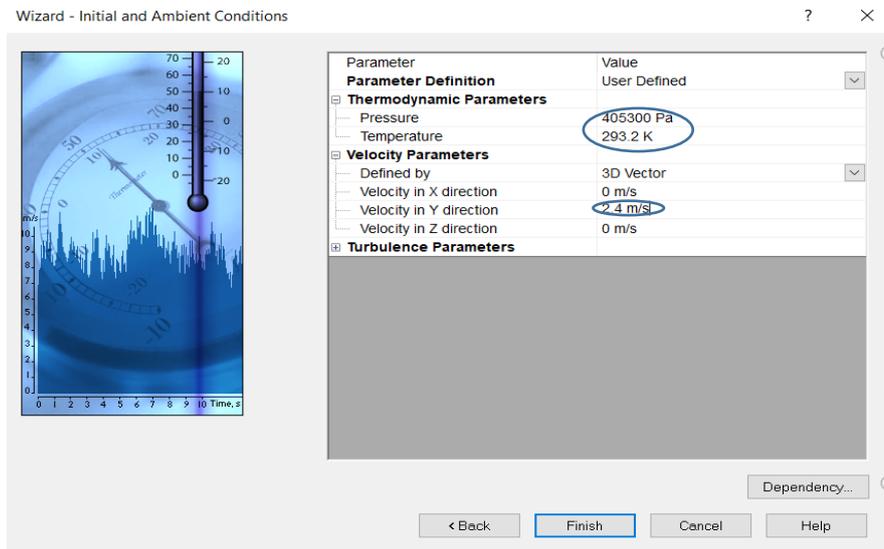


Figura III.43. Introducción de los parámetros de presión, velocidad y temperatura.

Introducidos los parámetros para el estudio hidrodinámico, se deberá definir la geometría de la zona donde tendrá lugar la simulación. Se selecciona “Computational domain” donde se podrá dar el volumen deseado.

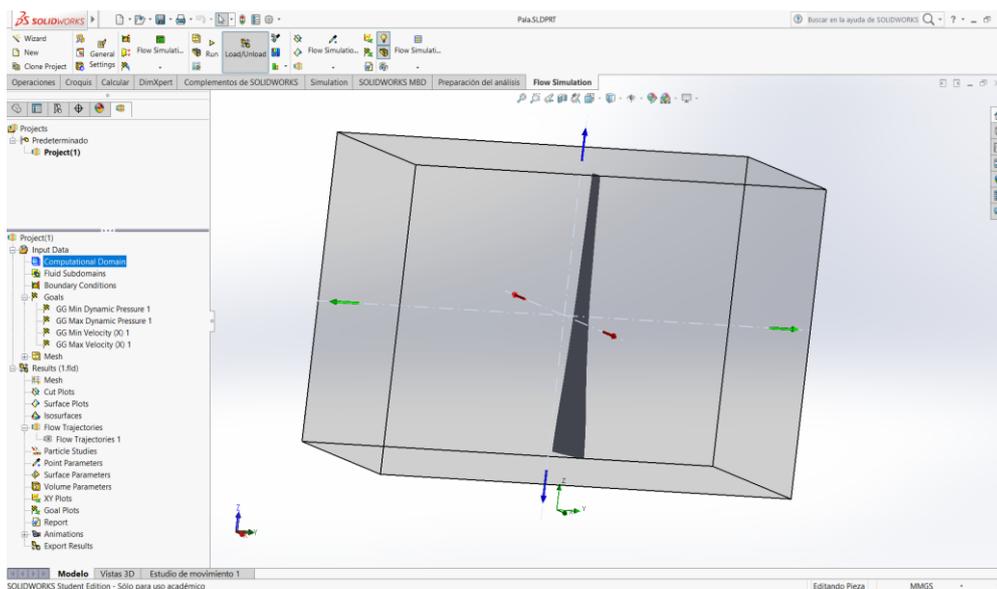


Figura III.44. Se define el volumen donde tendrá lugar la simulación.

III. Desarrollo proyecto

El paso siguiente será seleccionar las variables que se desean obtener de la simulación. Será necesaria la variable de presión dinámica, ya que será la que represente las cargas que actuarán sobre la superficie de la pala. De la presión dinámica se obtendrán las fuerzas que serán utilizadas en el estudio estático o estructural. En el árbol desplegable situado a la izquierda de la pantalla disponemos de la carpeta “goals”, en ella figuran numerosas variables, presionando con el botón derecho del ratón seleccionamos “insert global goals” seguidamente clicamos en presión y velocidad.

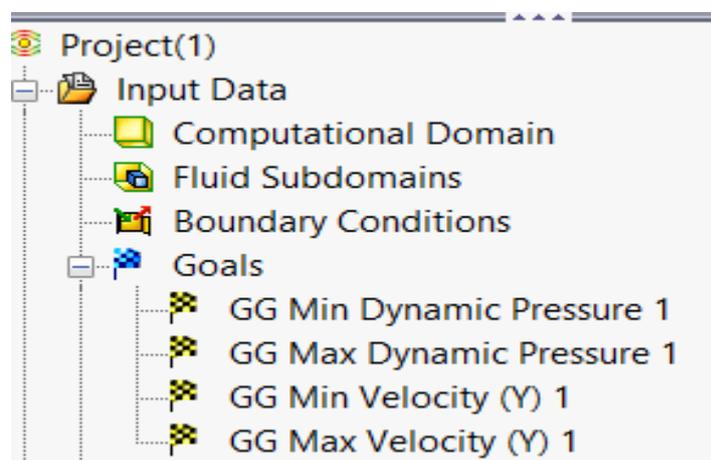


Figura III.45. Selección de las variables de presión dinámica y velocidad.

En la barra principal de comandos se encuentra el comando “run” y debajo a la izquierda el comando “calculation control options”. Este último nos permitirá entre otras opciones el poder definir el número de iteraciones que deseamos calcule el programa, se han fijado 50 iteraciones.



Figura III.46. Comando Run y Calculation control options.

III. Desarrollo proyecto

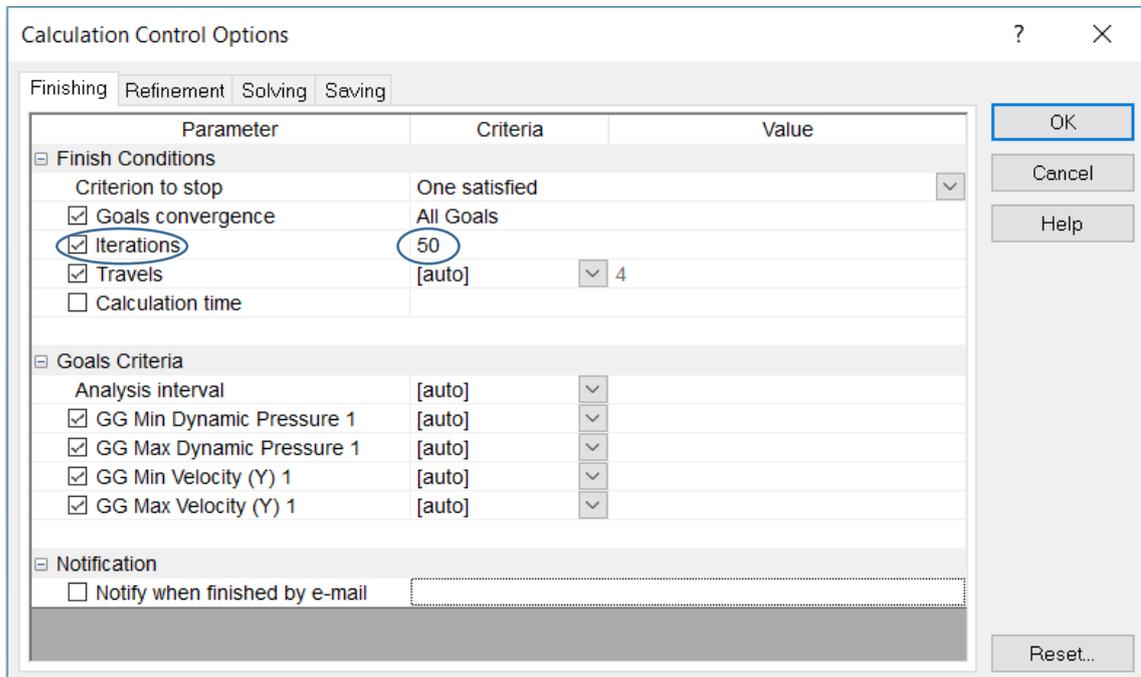


Figura III.47. Se definen 50 iteraciones.

Una vez fijadas las iteraciones podemos comenzar la simulación accionando el comando “Run”.

A continuación, seleccionaremos con el botón derecho en la carpeta “Flow trajectories” el comando “show”, nos mostrará en pantalla mediante una escala de colores la variación de presión y velocidad respectivamente.

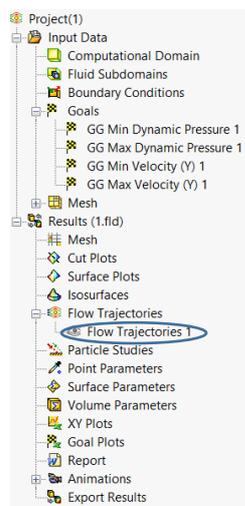


Figura III.48. Muestra la visualización de las variables predefinidas de presión y velocidad.

III. Desarrollo proyecto

En las siguientes imágenes se puede apreciar como la presión varía conforme el fluido impacta con la superficie de la pala, en este caso la presión aumenta significativamente (la pala tiene empuje), tal y como establece el teorema de Bernoulli si la presión aumenta en una zona la velocidad disminuye y viceversa. A la salida de la pala la presión disminuye por debajo de las condiciones de trabajo (405300 Pa) por lo que en esta zona el fluido aumenta su velocidad (la pala presenta succión en esta zona). Estas presiones dinámicas son las cargas que actúan sobre la pala y las que proporcionan las fuerzas de sustentación y arrastre.

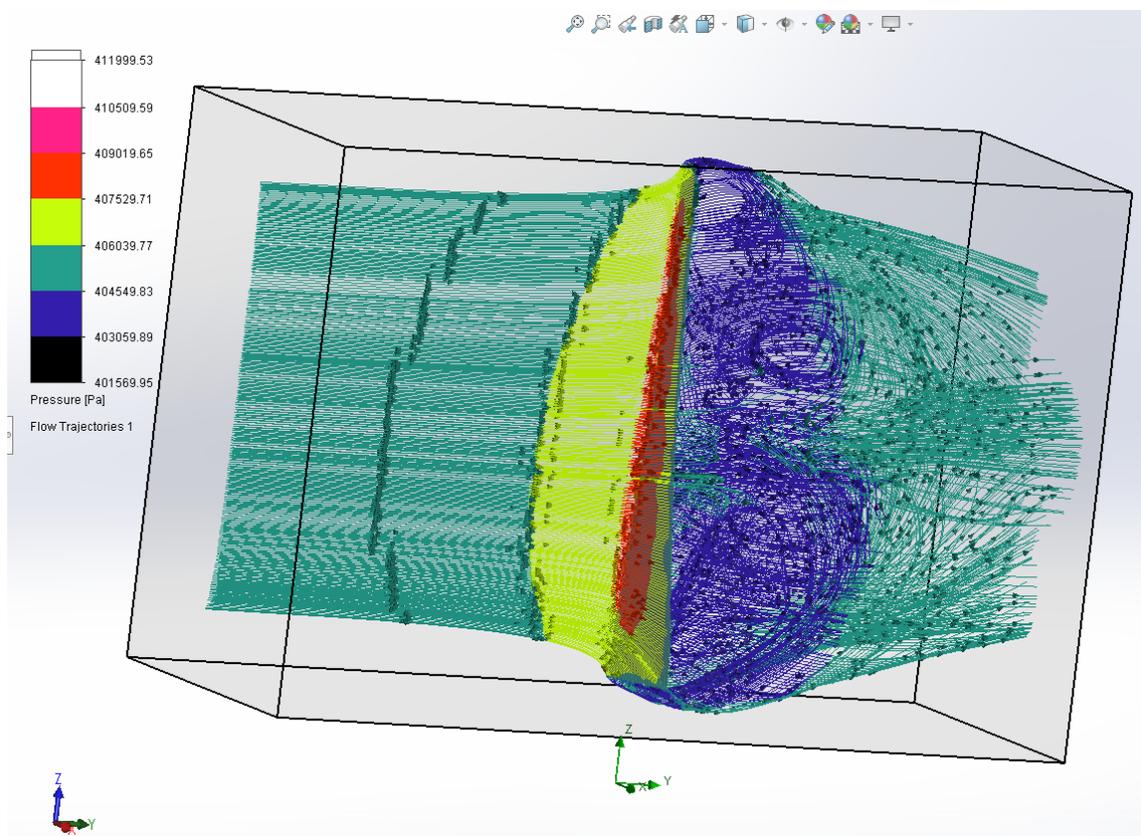


Figura III.49. Comportamiento de la presión dinámica en la pala.

III. Desarrollo proyecto

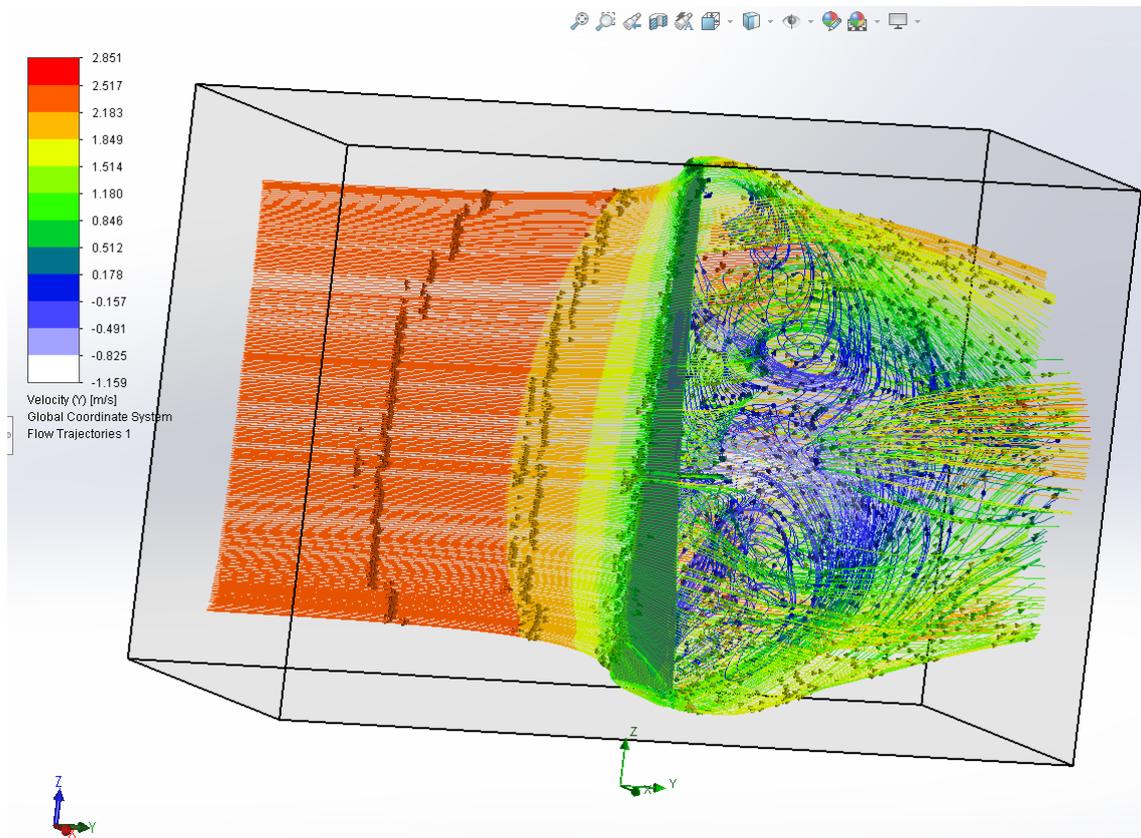


Figura III.50. Comportamiento de la velocidad en la pala.

III. Desarrollo proyecto

III.4. SELECCIÓN DE MATERIALES.

III.4.1. Composites.

El material compuesto o composite está formado por fibras alineadas en el interior de una matriz la cual las mantiene unidas y facilita que se distribuyan los esfuerzos. La fibra es la encargada de soportar las cargas mientras que la matriz absorbe los impactos y se encarga del comportamiento a fatiga.

Para el diseño de la pala se emplearán dos composites diferentes, uno de fibras de carbono con resina epoxy (CF_EP) y otro con fibra de vidrio y resina epoxy (GF_EP), se compararán y en función de su comportamiento mecánico y sus costes se empleará un composite u otro.

Se deberá tener en cuenta el comportamiento ortotrópico del material compuesto, las láminas del composite donde las fibras irán orientadas en diferentes ángulos es de suma importancia, ya que darán las propiedades mecánicas finales al laminado. El objetivo es tratar de conseguir un comportamiento cuasi-isotrópico en el laminado y dotarlo de resistencia y rigidez con una buena estabilidad dimensional y un buen comportamiento mecánico antes las diversas sollicitaciones a las que se verá expuesta la pala.

La elección de un material compuesto está relacionada con las numerosas ventajas que estos aportan: ligereza, propiedades químicas (resistente a la corrosión), propiedades mecánicas (resistencia a la fatiga y rigidez), facilidad de modelaje y libertad de formas, propiedades de trabajo (mantenimiento reducido).

Se obtienen las propiedades de la resina epoxy, la fibra de vidrio y la fibra de carbono a través de la base de datos del software CES Edupack. Para la fibra de vidrio se empleará la de grado S de 10 micras de monofilamento de fibra y para la fibra de carbono se empleará la de alto módulo molecular (HM) de 5 micras.

Una vez conocidas las propiedades de cada material compuesto se deberán introducir en el programa SolidWorks para posteriormente someter a la pala a un

III. Desarrollo proyecto

estudio estático. Debido al comportamiento ortotrópico de material por el cual estos se comportan de manera diferente en los tres ejes de direcciones, resulta necesario realizar un cálculo mediante métodos micromecánicos para obtener en cada dirección las propiedades del composite, el método a emplear será el de Chamis.

Tabla III.4. Propiedades de la Fibra de Carbono y resina epoxy. (El subíndice 1 corresponde a la dirección X, el 2 corresponde a la dirección Y, el 3 corresponde a la dirección Z).

FIBRA DE CARBONO			RESINA EPOXY		
Ef11	379212	MPa	ρ_m	1180	kg/m3
Ef22	62053	MPa	Em	3500	MPa
v12	0,2		vm	0,35	
v23	0,25		Gm	1296,2963	MPa
G12	75842	MPa	SmT	55	MPa
G23	48263	MPa	SmC	103	MPa
Xft	2500	MPa	SmS	55	MPa
Xfc	1500	MPa	Vf	0,7	
ρ_f	1700	Kg/m3			

III.4.2. Cálculo de constantes elásticas y resistentes por el método de Chamis.

Conocidos los valores de la fibra de carbono y de la resina epoxy se calcularán las constantes elásticas.

Para el cálculo del módulo de Young en la dirección longitudinal a la fibra (E_1), se emplea el volumen de fibra que contiene junto con los módulos de elasticidad de la fibra y la matriz:

$$E_1 = E_{f11} \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) = 266498,4 \text{ MPa}$$

El módulo de Young en la dirección transversal de la fibra (E_2) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_2 = E_m \cdot \left(\frac{1}{(1 - \sqrt{V_f}) - \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}}\right)} \right) = 16624,67 \text{ MPa}$$

$$E_2 = E_3$$

III. Desarrollo proyecto

Para el cálculo de los coeficientes de Poisson se utiliza la siguiente fórmula:

$$v_{12} = v_{12f} \cdot V_f + v_m \cdot (1 - V_f) = 0,245$$

$$v_{12} = v_{13}$$

Para el cálculo de los módulos de cortadura se emplean las siguientes expresiones:

$$G_{12} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{12f}}\right)} = 7297,313 \text{ MPa}$$

$$G_{12} = G_{13}$$

$$G_{23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{23f}}\right)} = 6976,393 \text{ MPa}$$

Una vez conocido el módulo de cortadura G_{23} se puede calcular el coeficiente de Poisson transversal v_{23} que no está contenido en el plano.

$$v_{23} = \frac{E_2}{2 \cdot G_{23}} = 0,191$$

Conocidas las constantes elásticas del material compuesto formado por fibra de carbono y resina epoxi, se pueden obtener las constantes resistentes: tensión de rotura a tracción y compresión tanto en la dirección transversal como longitudinal, así como la tensión de rotura a cortadura.

Cálculo de la tensión de rotura a tracción en la dirección longitudinal X_t y transversal Y_t :

$$X_t = V_f \cdot X_{ft} = 1750 \text{ MPa}$$

$$Y_t = S_{mT} \cdot \left[1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}}\right)\right] = 47,91 \text{ MPa}$$

III. Desarrollo proyecto

Cálculo de la tensión de rotura a compresión en la dirección longitudinal X_c y transversal Y_c :

$$X_c = V_f \cdot X_{fc} = 1050 \text{ MPa}$$

$$Y_c = S_{mC} \cdot \left[1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}} \right) \right] = 89,7 \text{ MPa}$$

Cálculo de la tensión de rotura a cortadura SC :

$$SC = S_{mS} \cdot \left[1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{12f}} \right) \right] = 47,6 \text{ MPa}$$

La densidad del material compuesto es la siguiente:

$$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f) = 1544 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Tabla III.5. Propiedades mecánicas de la CF_EP.

CONSTANTES ELÁSTICAS			CONSTANTES RESISTENTES		
E1	266498,4	MPa	Xt	1750	MPa
E2	16624,7	MPa	Yt	47,91	MPa
E3	16624,7	MPa	Xc	1050	MPa
v12	0,245		Yc	89,72	MPa
v13	0,245		SC	47,61	MPa
v23	0,191		ρ	1544	Kg/m3
G12	7297,31	MPa			
G13	7297,31	MPa			
G23	6976,39	MPa			

Para el caso de la fibra de vidrio con resina epoxi (GF_EP) se emplea el mismo método de cálculo. A continuación, se muestran las propiedades de la fibra de vidrio y la resina epoxi:

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.4. Propiedades de la Fibra de Vidrio y resina epoxy. (El subíndice 1 corresponde a la dirección X, el 2 corresponde a la dirección Y, el 3 corresponde a la dirección Z).

FIBRA DE VIDRIO			RESINA EPOXY		
Ef11	73084	MPa	ρ_m	1180	Kg/m ³
Ef22	14616,8	MPa	Em	3500	MPa
v12	0,22		vm	0,35	
v23	0,22		Gm	1296,2963	MPa
G12	30130	MPa	SmT	55	MPa
G23	18078	MPa	SmC	103	MPa
Xft	2757	MPa	SmS	55	MPa
Xfc	1800	MPa	Vf	0,65	
ρ_f	2490	Kg/m ³			

Tras haber aplicado el método de Chamis se obtienen las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio con resina epoxy.

Tabla III.5. Propiedades mecánicas de la GF_EP.

CONSTANTES ELÁSTICAS			CONSTANTES RESISTENTES		
E1	48729,6	MPa	Xt	1792	MPa
E2	9048	MPa	Yt	48,5	MPa
E3	9048	MPa	Xc	1170	MPa
v12	0,265		Yc	90,8	MPa
v13	0,265		SC	46,8	MPa
v23	0,122		ρ	2100	Kg/m ³
G12	5674	MPa			
G13	5674	MPa			
G23	1792	MPa			

Las propiedades mecánicas de la CF_EP son superiores a las de la GF_EP, ambas poseen buenas cualidades para poder emplearse en la fabricación de la pala, la elección en este caso es puramente económica siendo la opción más acertada el uso de la Fibra de vidrio y resina epoxy.

El comportamiento de los dos laminados es cuasi-isotrópico ya que tiene una capa en cada dirección, esto significa que se comporta prácticamente por igual en todas direcciones como se puede apreciar en la siguiente gráfica polar obtenida con el software eLamX.

III. Desarrollo proyecto

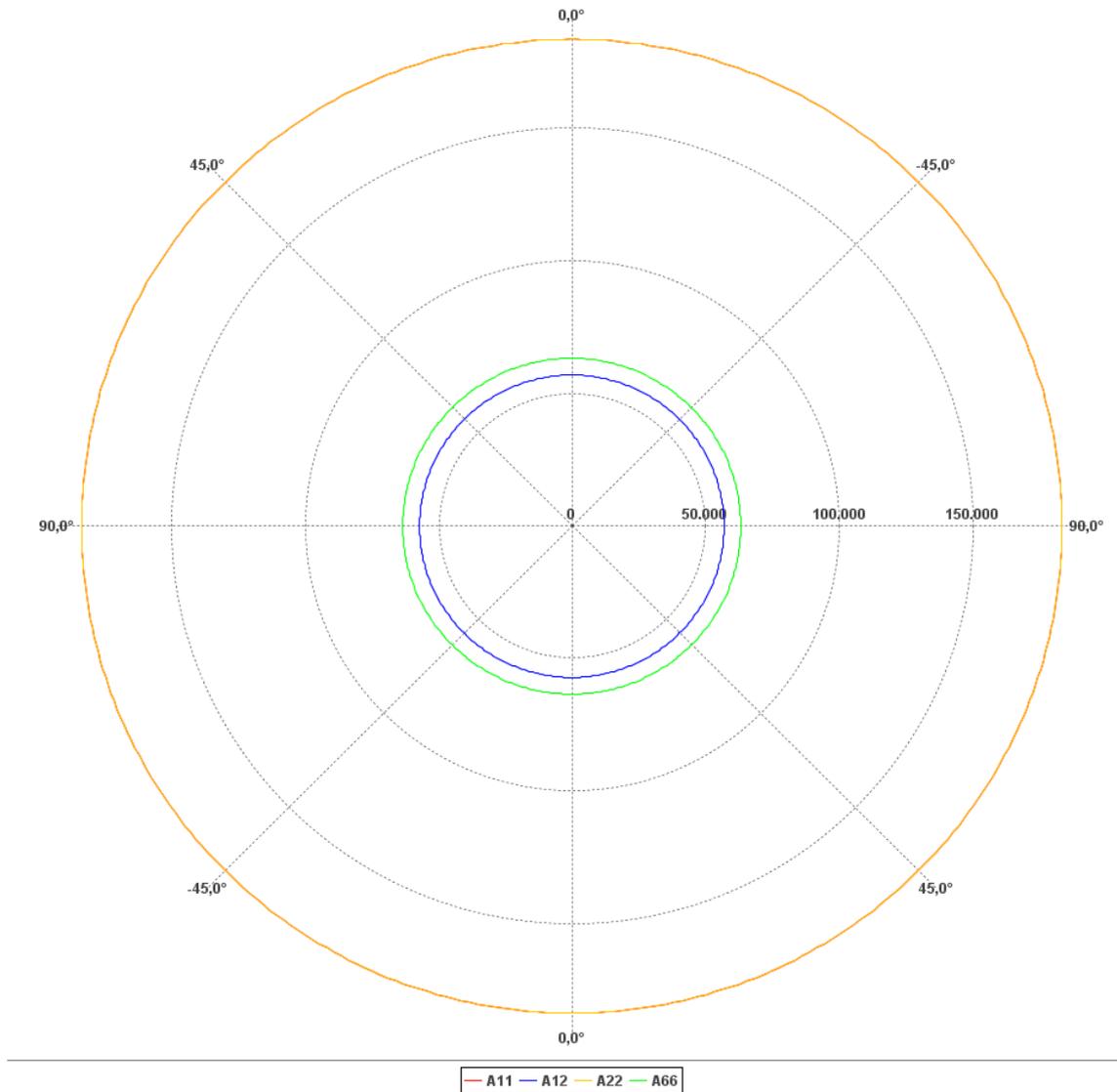


Figura III.51. Gráfico polar del laminado CF_EP.

Donde:

A11 Está directamente relacionado con el módulo en la dirección X

A22 Está directamente relacionado con el módulo en la dirección Y

A12 Está directamente relacionado con el módulo de Poisson

A66 Está directamente relacionado con el módulo de cortadura.

III. Desarrollo proyecto

III.5. ESTUDIO ESTÁTICO DE LA PALA.

Conocidas las cargas a las que está expuesta la pala en función de la velocidad del agua, y una vez obtenidas las fuerzas resultantes con el estudio hidrodinámico, se puede realizar con el uso del software de elementos finitos SolidWorks Simulation el estudio estático de la pala como si de una viga en voladizo se tratará.

Se van a realizar dos simulaciones, la primera de ellas para la fibra de Carbono con resina epoxi y la otra para la fibra de Vidrio con resina epoxi, y de esta forma realizar una comparación entre ellas.

A continuación, se explicarán los pasos a seguir para llevar a cabo la simulación, se comenzará por la CF_EP. En primer lugar, se deben de exportar las presiones generadas anteriormente por la herramienta “Flow simulation” a “simulation”. Pulsando en herramientas, “Flow simulation”, “tolos”, y por último “Export results to simulation”, tal y como se muestra a continuación:

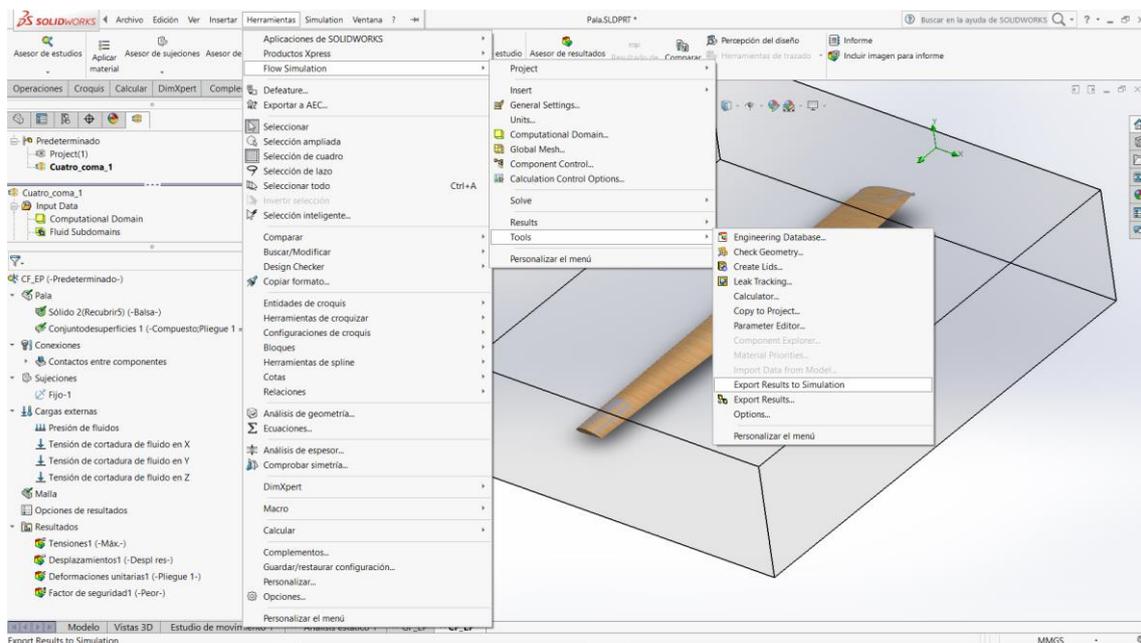


Figura III.52. Exportación de los resultados hidrodinámicos a la simulación.

III. Desarrollo proyecto

En la barra principal de comandos se selecciona “Asesor de estudios, nuevo estudio”:

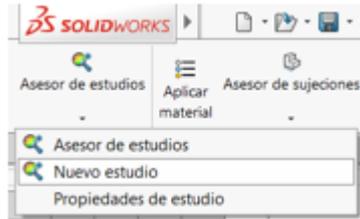


Figura III.53. Elección de nuevo estudio.

Se debe de seleccionar un estudio estático:

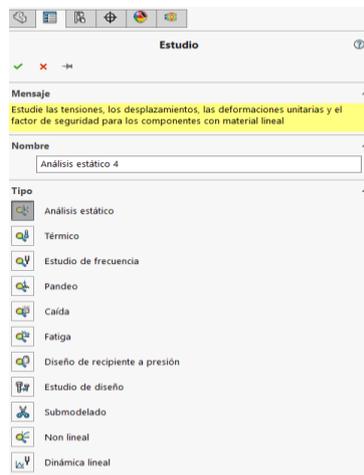


Figura III.54. Elección de análisis estático.

A la izquierda de la pantalla se encuentran los diferentes desplegables con los distintos pasos a seguir para realizar la simulación, la elección del material del interior de la pala se realizará pinchando con el botón derecho sobre “solido 2 recubrir” y a continuación se seleccionará “Aplicar/Editar material”

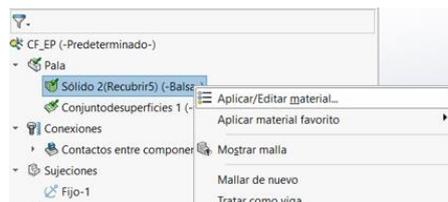


Figura III.55. Edición y aplicación del material en el interior de la pala.

III. Desarrollo proyecto

Para el sólido se ha utilizado madera de balsa y a continuación se edita el tipo de material compuesto a base de laminados para la superficie equidistante creada que será la encargada de soportar todos los esfuerzos. Con el botón derecho sobre “conjunto de superficies”, seleccionamos “editar definición”:

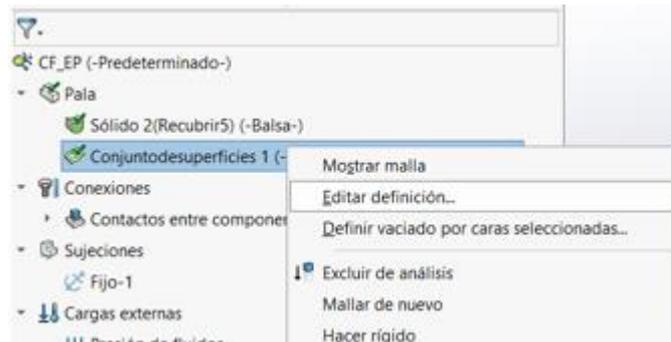


Figura III.56. Edición y aplicación del material en la superficie creada.

Se elige un material compuesto, en vista preliminar completa, en el caso de la pala sometida a estudio se procede a crear un laminado compuesto por 8 capas simétrico:

$$[45/-45/0/90]_S$$

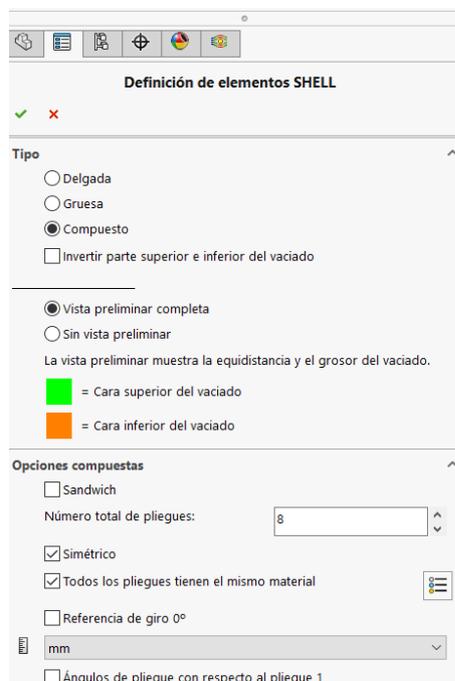


Figura III.57. Edición y aplicación del material en la superficie creada.

III. Desarrollo proyecto

Se crea el laminado de 8 capas con sus respectivos ángulos y espesores, la elección del espesor es de 0,25 mm. También se debe de tener en cuenta donde se comienzan a colocar las capas, en el caso de la pala es justo encima del sólido, es por ello que se selecciona la equidistancia superior.

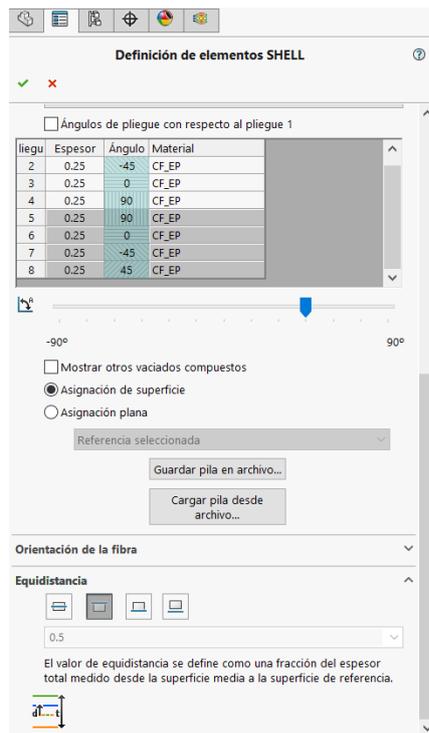


Figura III.58. Creación del laminado compuesto.

Los contactos entre componentes deben de ser una unión rígida, ya que contenemos un sólido junto a una superficie. Lo que se pretende es que se traspasen los esfuerzos entre componentes y no trabajen como piezas separadas.



Figura III.59. Unión rígida entre componentes.

Se define la sujeción de la pieza en la raíz de la pala, dándole la misma consideración como si de una viga en voladizo se tratara, con el fin de poder estudiar las deformaciones y tensiones que se generan.

III. Desarrollo proyecto

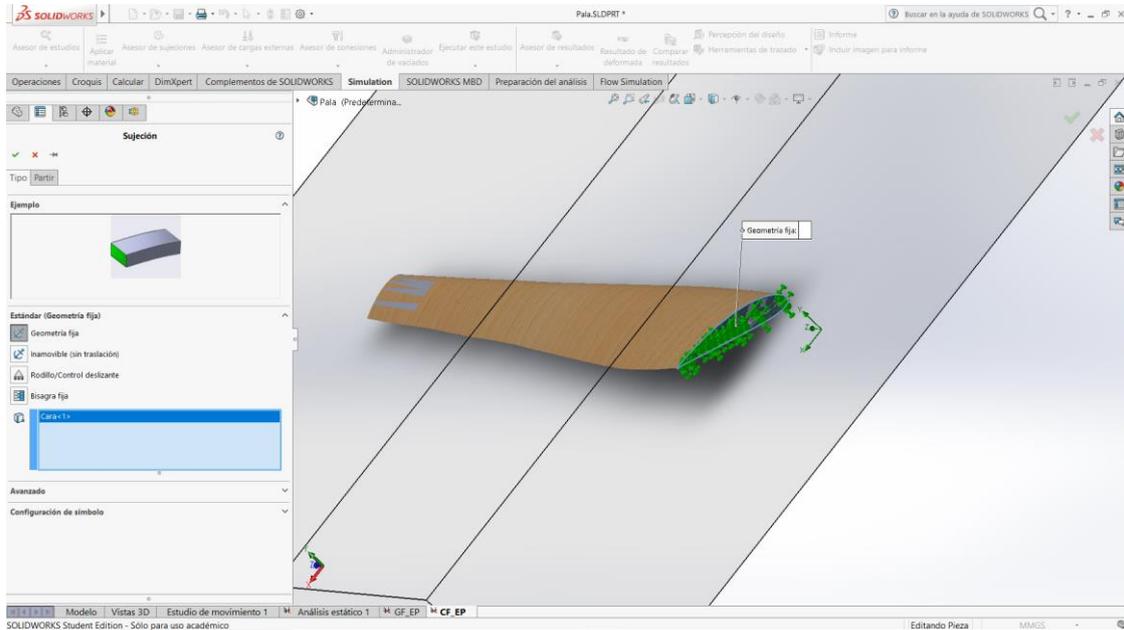


Figura III.60. Selección de la sujeción fija en la raíz de la pala.

A continuación se deben de introducir los valores de las presiones generadas en el estudio hidrodinámico y que se han exportado, pulsando sobre “cargas externas”, “efectos de flujo”, incluimos los efectos de la presión de fluidos desde SolidWorks, “Flow simulation”, por último importamos el archivo con el formato “.fld”

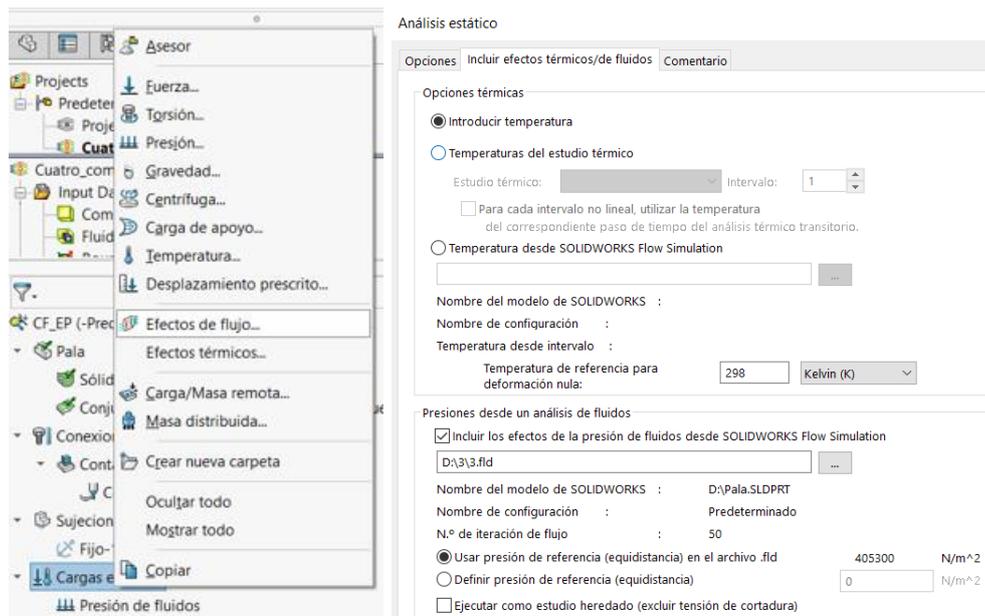


Figura III.61. Introducción de las presiones generadas en “Flow Simulation”.

III. Desarrollo proyecto

Se define el mallado de la pieza para posteriormente poder ejecutarlo, el mallado divide la pieza en volúmenes más pequeños a los que se denomina elementos, los cuales están unidos por nodos, el programa mediante un análisis de elementos finitos realiza el cálculo de cada elemento. Según sea la calidad de la malla, la precisión del cálculo será mejor o peor. Se procede a elegir un mallado fino para obtener unos buenos resultados.

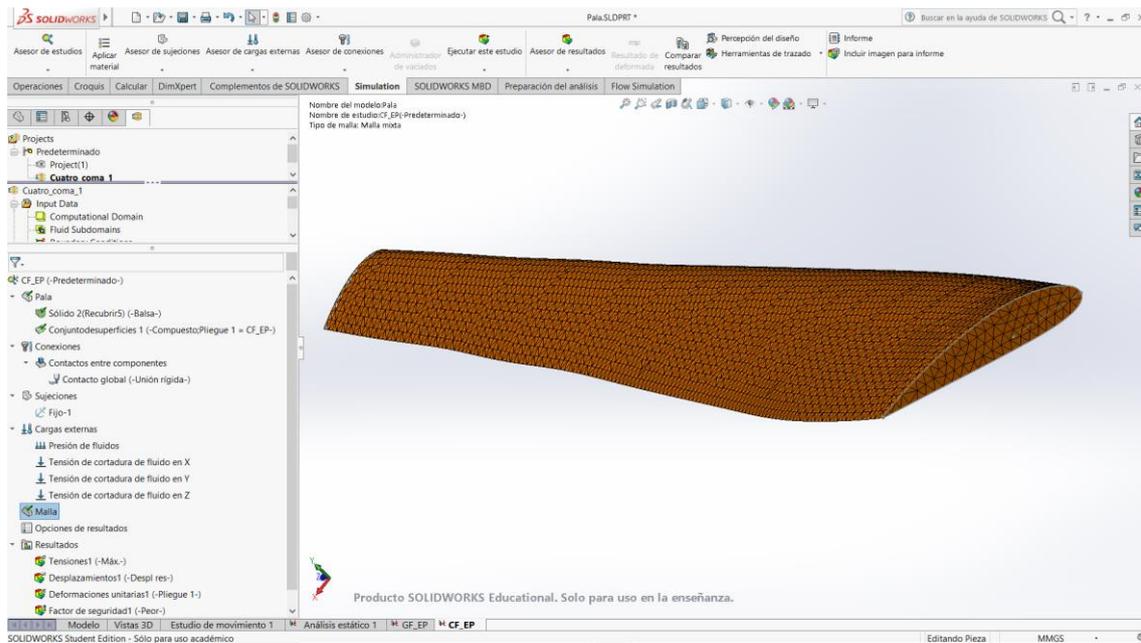


Figura III.62. Creación del mallado.

Una vez llegados a este punto solo queda elegir los resultados que se desean obtener y ejecutar el estudio. Los resultados del estudio estático serán las tensiones principales, la deformación resultante y el factor de seguridad.

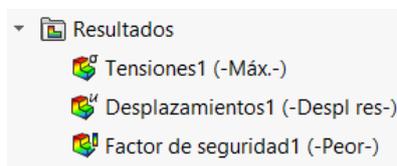


Figura III.63. Resultados que desean obtener.

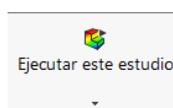


Figura III.64. Ejecución del estudio.

III. Desarrollo proyecto

Introducidos los parámetros iniciales y los materiales, se puede proceder a ejecutar la simulación. Se obtendrán las tensiones principales en la dirección longitudinal P1, transversal P2 y cortante P3, así como los desplazamientos que se originen como consecuencia de las sollicitaciones a las que se ve expuesta la pala, también se obtendrá el factor de seguridad mínimo. Se empleará el criterio de máxima tensión por tratarse de un material frágil debiéndose de conocer el comportamiento de la pala en las tensiones principales, para ello debe de cumplir con los siguientes criterios:

Tabla III.6. Teoría del fallo de máxima tensión.

Tensión Principal	Criterio que debe cumplir
σ_{11}	Tracción $\sigma_{11} \leq X_T$
	Compresión $ \sigma_{11} \leq X_C$
σ_{22}	Tracción $\sigma_{22} \leq Y_T$
	Compresión $ \sigma_{22} \leq Y_C$
σ_{12}	$ \sigma_{12} \leq S_{XY}$

X_T y X_C corresponden a las tensiones de rotura de tracción y compresión respectivamente en la dirección 1.

Y_T y Y_C corresponden a las tensiones de rotura de tracción y compresión respectivamente en la dirección 2.

S_{XY} corresponde a la tensión de rotura a cortadura.

El estudio tensional se aplicará a ambos materiales compuestos, la Fibra de Carbono con Resina epoxy y la Fibra de Vidrio con Resina epoxy.

III. Desarrollo proyecto

III.5.1. Resultados del estudio estático para la CF_EP.

Las tensiones principales que se han generado a partir de ejecutar la simulación en SolidWorks son las siguientes:

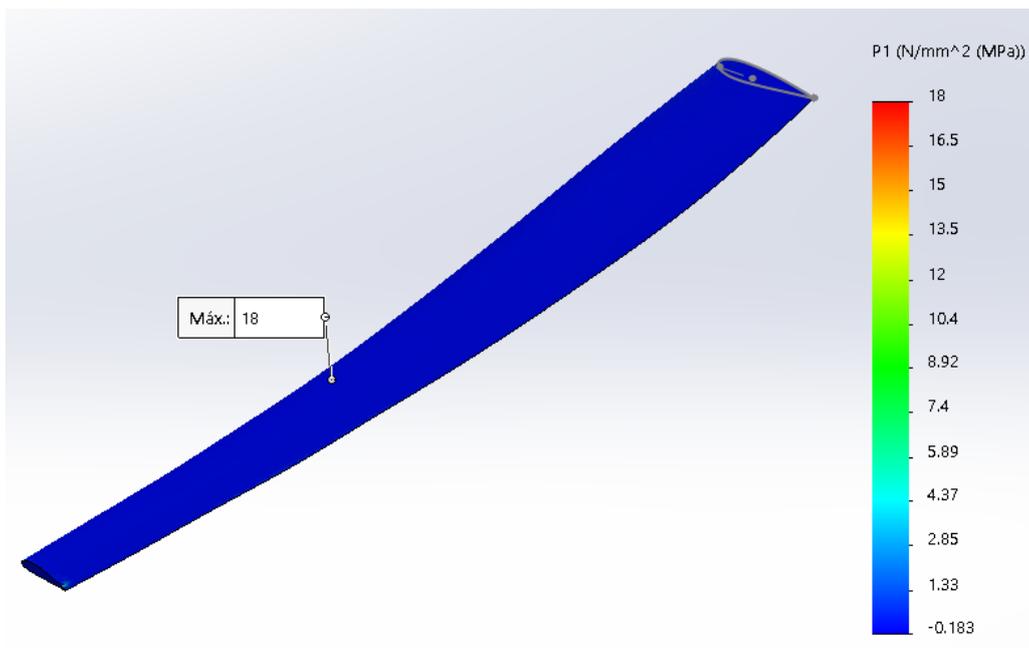


Figura III.65. Resultados de la tensión principal σ_{11} para la CF_EP.

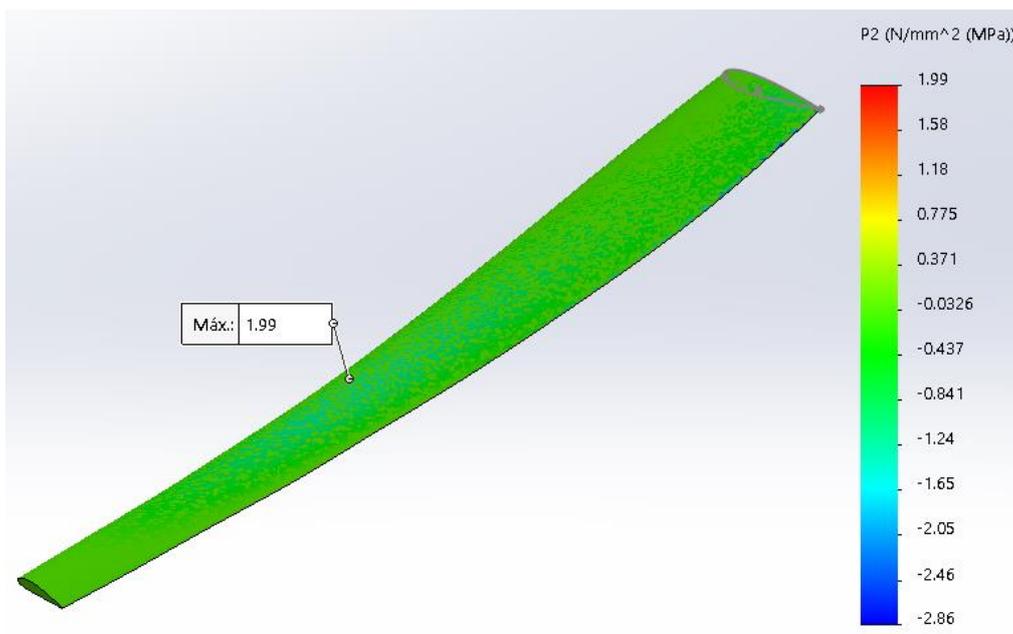


Figura III.66. Resultados de la tensión principal σ_{22} para la CF_EP.

III. Desarrollo proyecto

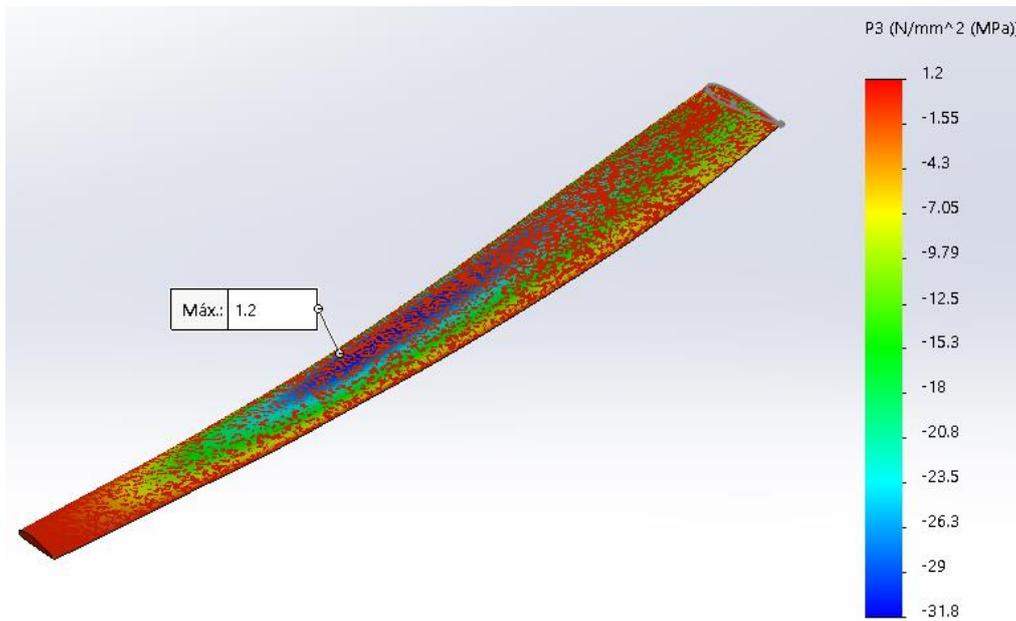


Figura III.67. Resultados de la tensión principal σ_{12} para la CF_EP.

A continuación se muestran las tensiones principales en cada dirección tanto a tracción, compresión como cortadura. Los valores de compresión se muestran en positivo al estar en valor absoluto.

Tabla III.6. Comparación de resultados con la teoría del fallo.

Tensión Principal	Valores (MPa)
σ_{11}	Tracción $18 \leq 1750$
	Compresión $0,183 \leq 1050$
σ_{22}	Tracción $1,99 \leq 47,91$
	Compresión $2,86 \leq 89,72$
σ_{12}	$31,8 \leq 47,61$

III. Desarrollo proyecto

Los resultados de las tensiones obtenidas son muy inferiores a los límites de las tensiones de rotura del material compuesto calculados mediante el método de Chamis en el apartado III.4.2. Al obtenerse unos valores tan inferiores a las tensiones de rotura del material se obtiene un factor de seguridad de 10,2. El factor de seguridad es homogéneo en toda la pala tal y como se muestra en la siguiente imagen:

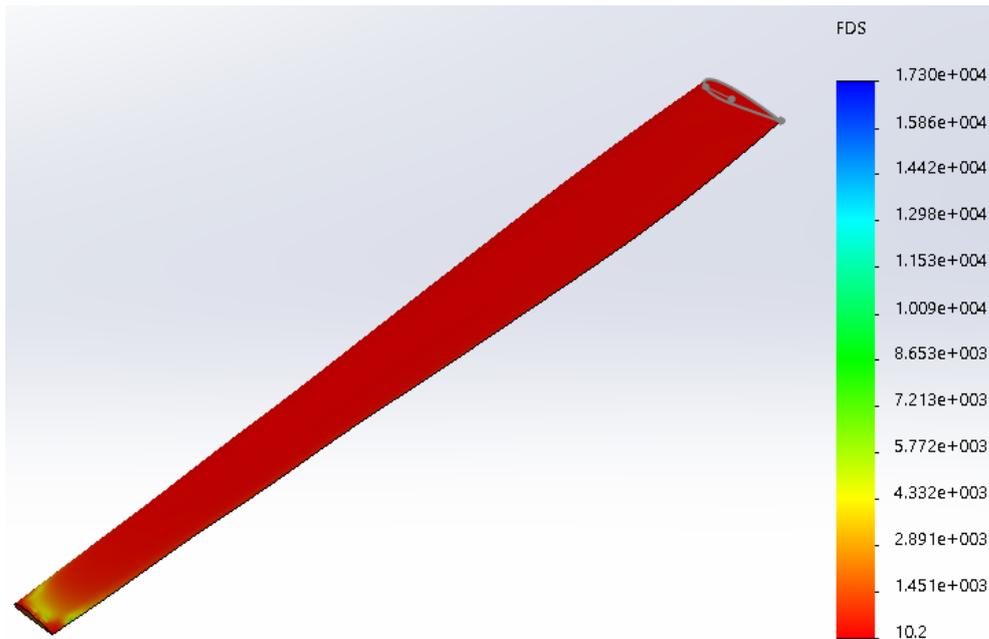


Figura III.68. Resultados del factor de seguridad para la CF_EP.

El motivo de que la pala esté sobredimensionada es porque se trata de estructuras diseñadas para perdurar a lo largo del tiempo, con una vida funcional de más de 25 años, ya que se trata de emplazamientos de difícil acceso para su mantenimiento.

En la siguiente imagen se muestran los desplazamientos que se originan en el extremo de la pala donde el espesor disminuye. Se debe tener en cuenta que se trata de un tramo de pala de 10 m por lo que los desplazamientos en la punta de pala serán notorios, de unos 7 cm, si bien es cierto que serán mayores en la GF_EP que en la CF_EP como se podrá comprobar más adelante.

III. Desarrollo proyecto

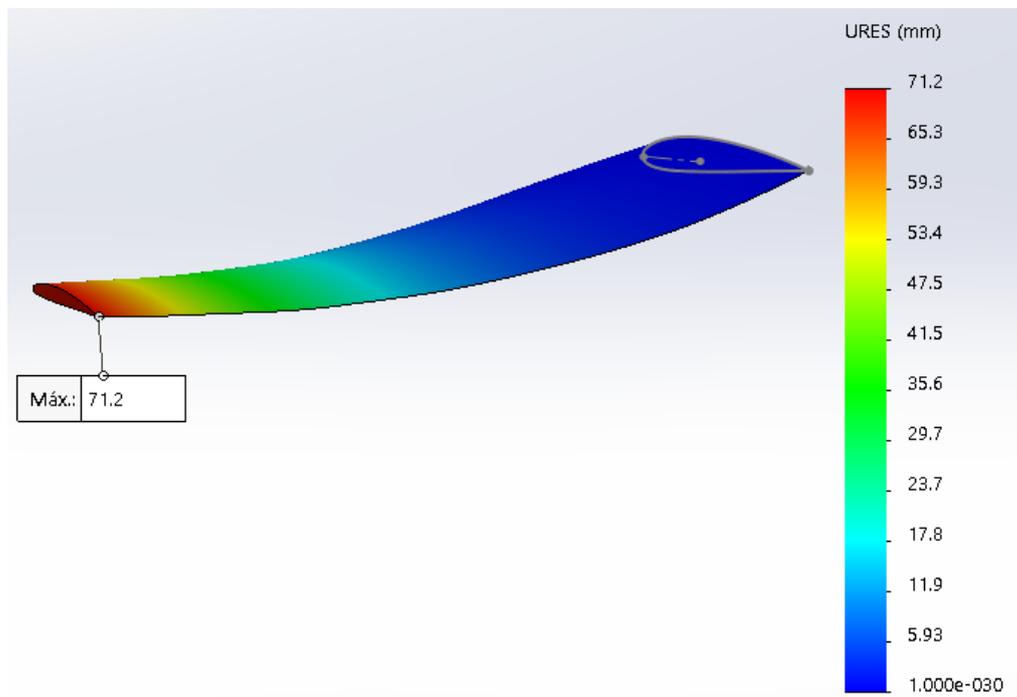


Figura III.69. Resultados de los desplazamientos para la CF_EP.

III. Desarrollo proyecto

III.5.2. Resultados del estudio estático para la GF_EP.

Las tensiones principales que se han generado a partir de ejecutar la simulación en SolidWorks son las siguientes:

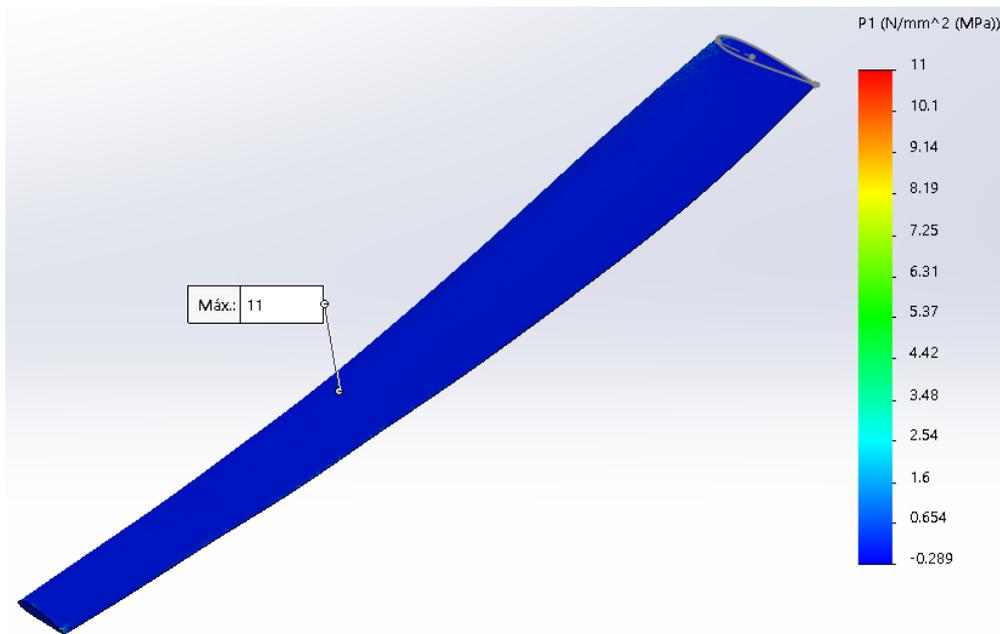


Figura III.70. Resultados de la tensión principal σ_{11} para la GF_EP.

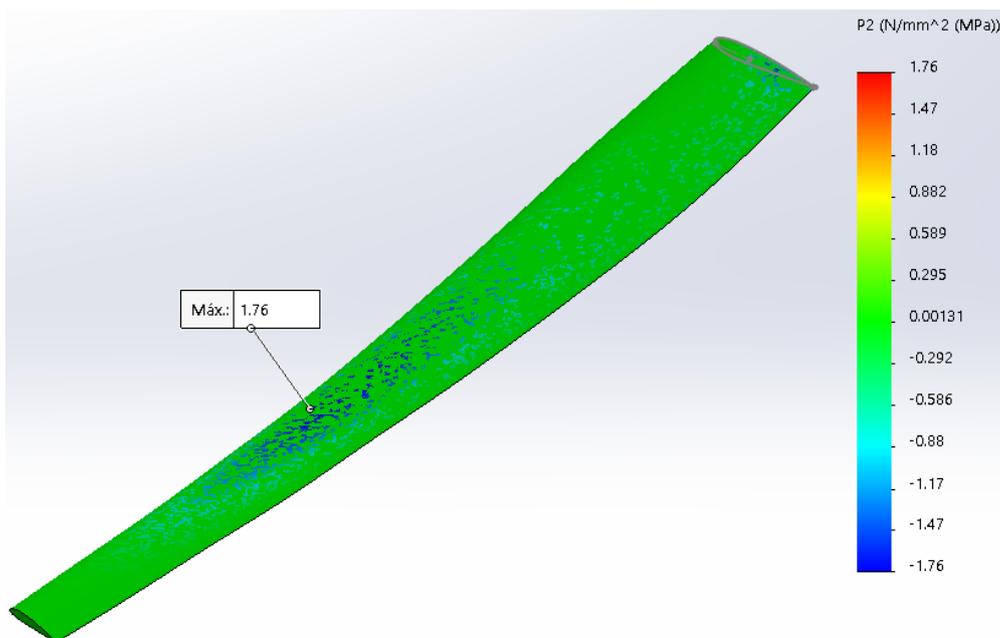


Figura III.71. Resultados de la tensión principal σ_{22} para la GF_EP.

III. Desarrollo proyecto

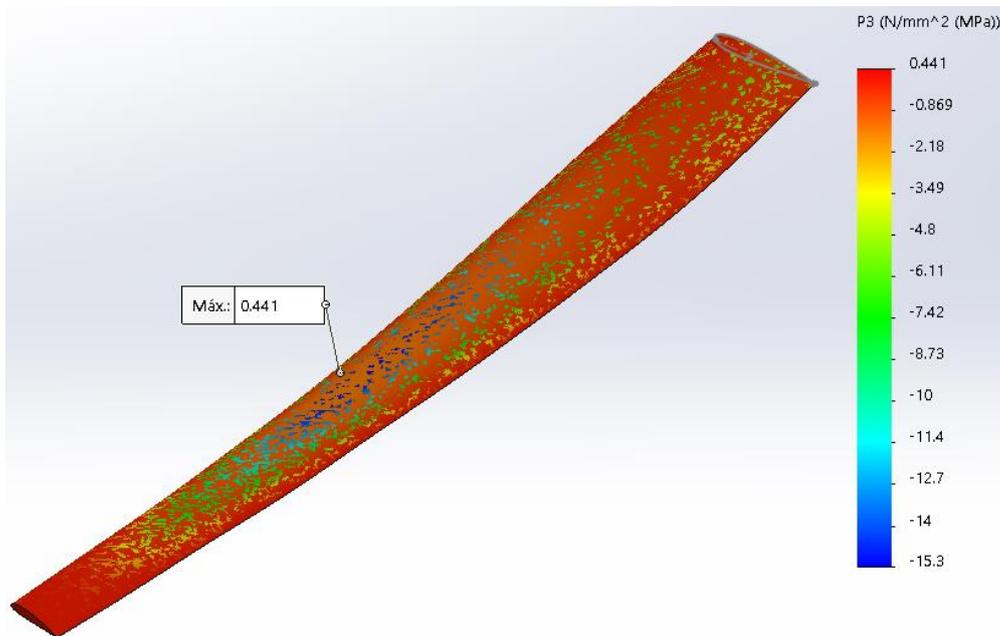


Figura III.72. Resultados de la tensión principal σ_{12} para la GF_EP.

A continuación, se muestran las tensiones principales en cada dirección tanto a tracción, compresión como cortadura.

Tabla III.7. Comparación de resultados con la teoría del fallo.

Tensión Principal	Valores (MPa)
σ_{11}	Tracción $11 \leq 1792$
	Compresión $0,289 \leq 1170$
σ_{22}	Tracción $1,76 \leq 48,5$
	Compresión $1,76 \leq 90,8$
σ_{12}	$15,3 \leq 46,8$

III. Desarrollo proyecto

Las tensiones generadas son inferiores a los límites de tensión de rotura del propio material, obteniéndose un factor de seguridad homogéneo en toda la pieza de 5,48 prácticamente la mitad en comparación con la CF_EP. Se muestra en la siguiente imagen el factor de seguridad de la GF_EP:

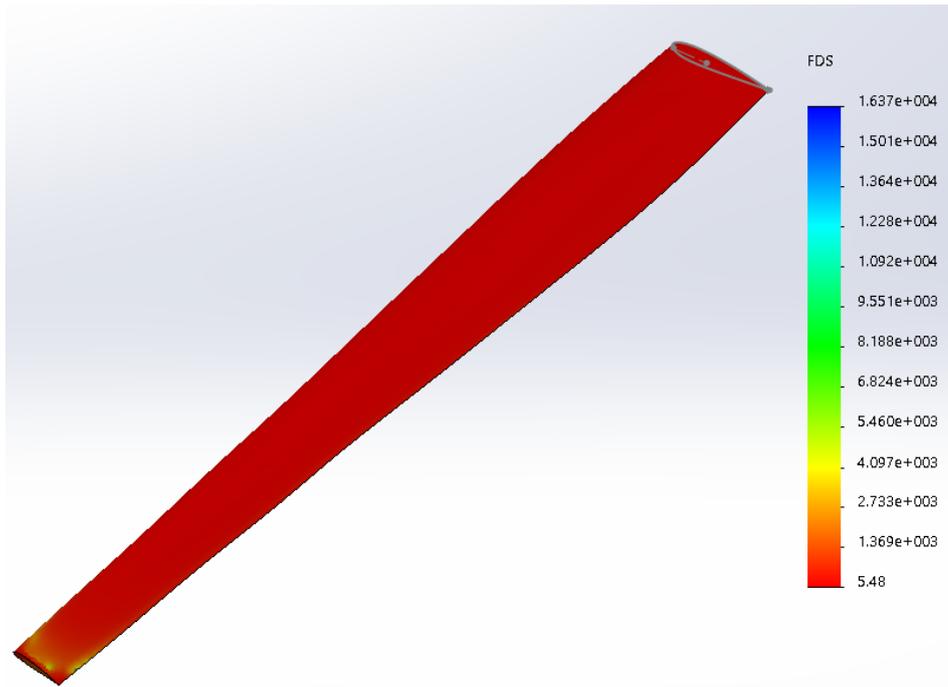


Figura III.73. Resultados del factor de seguridad para la GF_EP.

Es importante señalar que en la GF_EP se ha utilizado un espesor de capas de 0,25 mm, debido a que este espesor es el mínimo que se puede obtener en el mercado. El coeficiente de seguridad de la GF_EP también se encuentra sobredimensionado, no se ha podido reducir el número de capas (8) en la GF_EP, de hacerlo el coeficiente de seguridad se reducía considerablemente con valores por debajo de la unidad.

III. Desarrollo proyecto

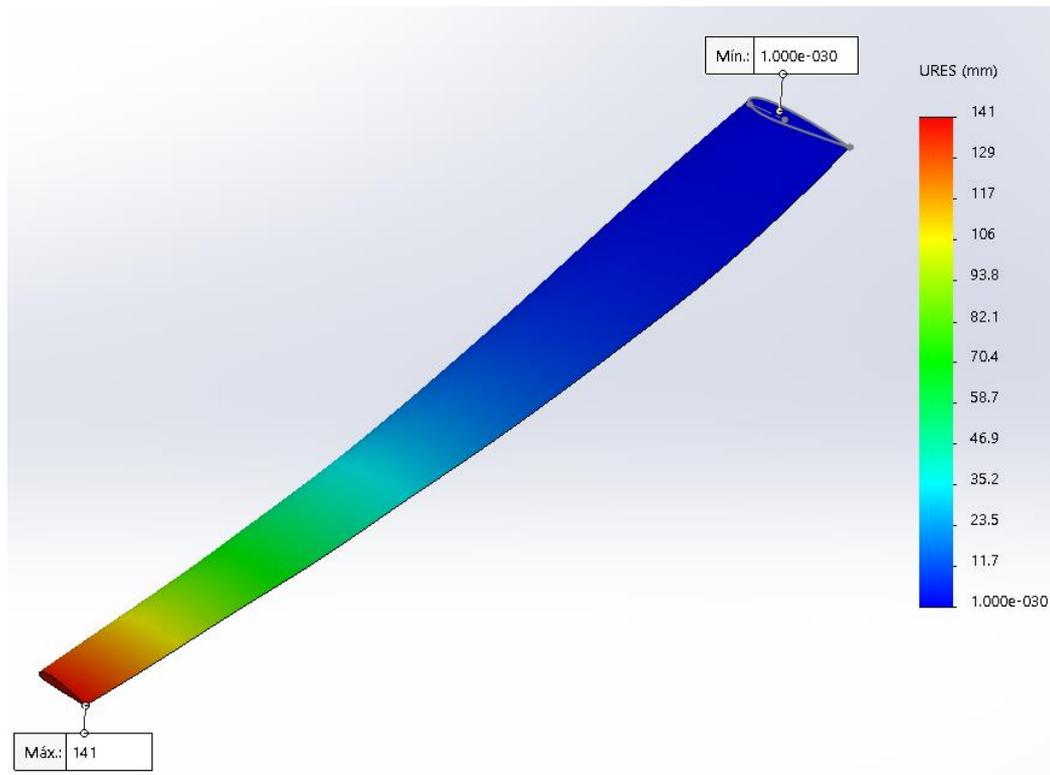


Figura III.74. Resultados de los desplazamientos para la GF_EP.

Los desplazamientos que se producen en la pala con la GF_EP son el doble en comparación con la CF_EP, pero perfectamente asumibles y coherentes teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de la GF_EP son algo inferiores.

III. Desarrollo proyecto

III.6. DISEÑO FINAL.

Realizada la geometría de la pala siguiendo unos parámetros de diseño y tras haber sometido a la misma a un estudio hidrodinámico, se obtuvieron las fuerzas que intervienen en la pala. Posteriormente se realizó un estudio estático en el que se conocieron los estados tensionales que se generan en cada situación. En este apartado se determinará que material final se empleará en la construcción de la pala.

Para ello se realizará una comparativa de los resultados más relevantes de los materiales compuestos que se han empleado en las simulaciones.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los coeficientes de seguridad de ambos composites:

Tabla III.8. Comparación de los coeficientes de seguridad de ambos materiales compuestos.

	CF_EP	GF_EP
Coefficiente de Seguridad	10,2	5,48

En ambos casos los coeficientes de seguridad obtenidos con el software SolidWorks son elevados, y ambos están sobredimensionados. Esto llevaría a poder pensar que se podrían emplear otro tipo de materiales más convencionales, pero dada la complejidad de las geometrías, el uso de los composites es la opción más acertada por su gran versatilidad a la hora de crear diferentes formas y curvaturas. La GF_EP presenta un menor coeficiente de seguridad debido a que sus propiedades mecánicas, aunque excelentes, son inferiores las de la CF_EP, en cualquier caso se encuentran ambos composites muy por debajo de sus límites de tensiones de rotura, confiriendo a la pala una larga vida funcional frente a todo tipo de sollicitaciones.

III. Desarrollo proyecto

En la siguiente tabla se comparan los desplazamientos en milímetros que se generan en los extremos de la pala:

Tabla III.9. Comparación de los desplazamientos máximos de ambos materiales compuestos en el extremo de la pala.

	Desplazamiento máximo (<i>mm</i>)
CF_EP	71,2
GF_EP	141

A pesar de que las deformaciones de la GF_EP son superiores a las de la CF_EP estas no llegan a romper la pala ni a formar deformaciones permanentes ya que no se supera en ningún momento el límite elástico.

Uno de los aspectos que va a resultar decisivo a la hora de elegir un composite u otro, es el coste de los materiales. Teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de ambos composites cumplen a la perfección con las sollicitaciones a las que se verán expuestos y que se trata de fabricar un número elevado de piezas, el coste determinará la elección de uno u otro, siendo más económica la GF_EP que la CF_EP.

Se muestra una tabla comparativa con los precios de ambos composites.

Tabla III.10. Precios de ambos materiales compuestos.

	Precio ($\text{€}/\text{Kg}$)
CF_EP	45
GF_EP	29,2

III. Desarrollo proyecto

El precio de la CF_EP es más elevado, la elección de este material compuesto sería lógica si se fuesen a realizar muy pocas piezas. Es por ello que la elección idónea para la fabricación de una pala de una hélice de turbina mareomotriz sea la GF_EP ya que es irrelevante que el otro material tenga unas prestaciones mejores. Lo importante es que cumpliendo con todos los requisitos que se han ido desarrollando en el presente trabajo, además sea rentable en la fabricación, tratando de ahorrar dinero en los materiales.

III. Desarrollo proyecto

III.7. FABRICACIÓN.

III.7.1. Moldeo por contacto *Laminación manual.*

La técnica del laminado manual encuadra en el grupo de técnicas de moldeo por contacto, es una de las más antiguas de todas las técnicas conocidas en la fabricación de piezas con materiales compuestos.

Todas las técnicas de laminado por contacto no necesitan la aportación de calor externo para su polimerización al completo ni de la alta presión de moldeo para su estratificación.

A pesar de ser una técnica sencilla y artesanal, depende con frecuencia de la habilidad del operario y continúa siendo una de las más difundidas, tanto por su bajo coste como por su adecuación a piezas de diferentes tamaños y formas sin excesivos problemas.

El moldeo por colocación manual:

Se precisa de un molde abierto, debidamente acondicionado (pulido y con el uso de agentes desmoldeantes), son necesarios un molde macho y uno hembra (positivo y negativo), que encajen a la perfección. La resina utilizada se mezcla con un catalizador o endurecedor, de lo contrario, el curado puede llevar días o incluso semanas. Es importante la utilización de la proporción correcta de catalizador en la resina para asegurar el tiempo de curado correcto. Un 1% de catalizador es un curado lento, el 2% es la proporción recomendada, y el 3% dará un curado rápido.

Inicialmente se aplica una capa de *gelcoat* en el molde, lo que le dará un mejor acabado a la pieza terminada. El *gelcoat* es un material utilizado para proporcionar un acabado de alta calidad en la superficie visible de un material polimérico compuesto. Este es generalmente pigmentado para proporcionar una superficie de color brillante, que mejora la apariencia estética. La capa exterior de *gelcoat* normalmente oscila entre los 0,5 y los 0,8 mm de espesor, esta capa proporciona resistencia a la radiación ultravioleta y a la degradación de hidrólisis.

III. Desarrollo proyecto

A continuación, el molde se moja con la mezcla mediante vertido o brochas y pinceles. Las láminas de fibra de vidrio se colocan sobre el molde y se asientan en el mismo con rodillos de acero. La relación de resina y fibra es de un 30% resina y un 70% fibra, la resina utilizada en este caso epoxi, es de baja viscosidad (poco peso molecular) con el fin de mejorar el impregnado de las fibras.

Los rodillos se utilizan para asegurarse que la resina penetre en todas las capas, que la fibra se moje en todo el espesor del laminado y de que las burbujas de aire sean eliminadas.

Mediante el uso de herramientas de corte se eliminan los excesos de material en los bordes, esto se debe de realizar antes del curado ya que es más fácil de retirar. Una vez curado el material, se procede al desmoldeado de la pieza.

Se muestra a continuación una imagen que simplifica la explicación.

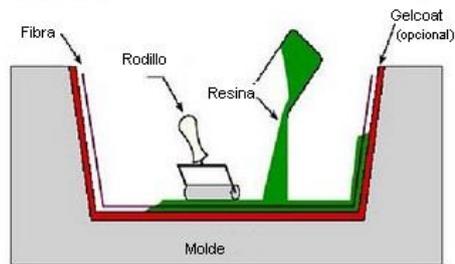


Figura III.75. ^{xxiii}Esquema del proceso de moldeo por contacto.

Ejemplo del molde con el operario en su interior :



Figura III.76. ^{xxiii} Molde abierto en el que se aplican los procesos descritos anteriormente.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.11. Ventajas e inconvenientes del proceso del moldeo por contacto.

Ventajas	Inconvenientes
Se pueden producir productos grandes y complejos	La calidad dependerá de las habilidades del moldeador
Proceso relativamente sencillo	Las piezas tienen una sola cara lisa que reproduce la superficie del molde
Inversión mínima en equipos	Ciclos excesivamente largos
Se puede utilizar una amplia gama de materiales	Salud y consideraciones de seguridad: las resinas de peso molecular más bajo utilizadas tienen el potencial de ser más dañinas que los productos de mayor peso molecular y también tienen una mayor tendencia a penetrar en la ropa.
Los cambios de diseño se ejecutan fácilmente	Concentraciones en el aire de estireno, se requieren sistemas de extracción costosos
Los trabajadores que se requieren son semi-cualificados	Las resinas deben de ser de baja viscosidad para ser utilizadas en el moldeo manual.

III. Desarrollo proyecto

III.8. ESTUDIO ECONÓMICO.

El estudio económico se llevará a cabo con el empleo del software informático CES Edupack el cual permite entre sus múltiples herramientas, disponer de una estimación de costes a la hora de elegir los materiales y los procesos de fabricación del producto final. Dado que la pala está compuesta por una estructura interna a modo de esqueleto, realizada con madera de balsa, y recubierta por una carcasa de material compuesto de fibra de vidrio con resina epoxy, se dividirá la pieza en dos partes. Una vez se conozcan los costes de cada parte se sumará el total del coste de la pieza.

-Madera de balsa.

Consultada la base de datos del programa observamos que se dispone de varios tipos de madera de balsa, se opta por la “ultra low density” concretamente “balsa (ochroma spp 0,17-0,21)”. En este mismo apartado se debe introducir en “Value of scrap material” el valor que se obtiene por desechar el producto que no es necesario. Las siguientes casillas hacen referencia al peso de la pieza y a su longitud. Estos valores se obtienen del programa SolidWorks. Por último, se debe introducir el número de piezas a fabricar.

Una vez elegido el material se debe de seleccionar el primer proceso de fabricación, es imprescindible para poder seguir avanzando en el programa elegir una de las opciones que se nos ofrecen. De todas las opciones que tenemos disponibles, la más “parecida” a la realidad sería la de extrusión de metales. Evidentemente es solo una orientación, el tronco de madera debe pasar por unos rodillos en los que reducirá su sección al retirarle la corteza, de ahí que se parezca en algo al proceso de extrusión. El segundo proceso de fabricación es un mecanizado por control numérico CNC con el que se obtendrán las geometrías deseadas.

La complejidad elegida es “simple” en el apartado de “overhead rate” donde se introduce un valor de 126 EUR/h que es el tipificado para España como la tasa de mano de obra local y los gastos generales para ejecutar las instalaciones de procesamiento, en función de las tasas de mano de obra y el valor energético. Por último, se introduce el

III. Desarrollo proyecto

parámetro “Capital write-off time” que hace referencia al tiempo de amortización del producto. El coste del proceso viene determinado por la base de datos del programa donde a partir del lote que se indique tiene un valor u otro. Una vez se ha creado el estudio se obtendrá el coste total del producto, incluido el material y el proceso de fabricación. Se muestra a continuación una imagen de todo el proceso y otra del precio final:

Figura III.77. Part Cost stimator para la obtención del precio de fabricación del núcleo de la pala con madera de balsa.

Part cost estimator				
Part cost	(i)	2,89e3	-	3,47e3 EUR
Part mass	(i)	140		kg
Batch size	(i)	360		
Material price per part	(i)	952	-	1,53e3 EUR
Primary process cost per part	(i)	5,17		EUR
Secondary process cost per part	(i)	1,94e3		EUR
Material price %	(i)	38,1		%
Primary process cost %	(i)	0,163		%
Secondary process cost %	(i)	61,1		%

Figura III.78. Precio de la fabricación del núcleo de la pala con madera de balsa.

III. Desarrollo proyecto

Para el material compuesto se va a emplear la fibra de vidrio con resina epoxi, la elección se ha llevado a cabo por una cuestión meramente económica. Consultada la base de datos interna del programa CES Edupack, se muestra una imagen comparativa de los precios de la fibra de carbono de 5 micras de alto módulo y la fibra de vidrio S de 10 micras.

General information

Designation ⓘ
Carbon, HM fiber

Typical uses ⓘ
Reinforcement, as single fibers or yarn or woven mat, in PMCs, MMCs, and CMSs

Composition overview

Compositional summary ⓘ

C		
Form	ⓘ	Fiber
Material family	ⓘ	Ceramic (technical)
Base material	ⓘ	C (Carbon)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)	ⓘ	100	%
------------	---	-----	---

Price

Price	ⓘ	* 37,5	- 45	EUR/kg
Price per unit volume	ⓘ	* 6,75e4	- 8,32e4	EUR/m ³

Figura III.79. Precio de la fibra de carbono de alto módulo de 5 micras.

General information

Designation ⓘ
Glass, S grade fiber

Typical uses ⓘ
Reinforcement, as single fibers or yarn or woven mat, in PMCs, MMCs, and CMSs

Composition overview

Compositional summary ⓘ

65%SiO2-25%Al2O3-10%MgO

Form	ⓘ	Fiber
Material family	ⓘ	Glass
Base material	ⓘ	Oxide

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al2O3 (alumina)	ⓘ	25	%
MgO (magnesia)	ⓘ	10	%
SiO2 (silica)	ⓘ	65	%

Price

Price	ⓘ	* 17,5	- 29,2	EUR/kg
Price per unit volume	ⓘ	* 4,35e4	- 7,28e4	EUR/m ³

Figura III.80. Precio de la fibra de vidrio S de 10 micras.

III. Desarrollo proyecto

-Fibra de vidrio con epoxi

Al igual que con el núcleo de madera de balsa, se procede a asignar el material compuesto en el que se deberá hacer referencia a la masa del material empleado, la longitud, el porcentaje de producto que se deshecha y el lote. Para el caso del lote, las unidades referenciadas de 350 piezas anuales, han sido consultadas en diferentes empresas del sector. Al tratarse de palas de dimensiones considerables, el número de piezas fabricadas anualmente no es muy alto. Posteriormente se debe seleccionar el proceso de fabricación, en este caso se trata del moldeo por colocación manual o Hand lay-up. En este proceso se incluye el precio de fabricar el molde y la pieza, incluyendo los materiales necesarios y equipos externos que se precisen.

Figura III.80. Part cost stimator para la obtención del precio de fabricación de la pala con GF_EP.

Part cost estimator				
Part cost	(i)	1,1e3	-	1,61e3 EUR
Part mass	(i)	49		kg
Batch size	(i)	360		
Material price per part	(i)	768	-	1,27e3 EUR
Primary process cost per part	(i)	336		EUR
Secondary process cost per part	(i)	0		EUR
Material price %	(i)	74,2		%
Primary process cost %	(i)	25,2		%
Secondary process cost %	(i)	0		%

Figura III.81. Precio de fabricación de la pala con la GF_EP.

III. Desarrollo proyecto

El precio total para la fabricación de la pala de una hélice de turbina de energía mareomotriz oscila los 5080 € para un lote de 350 unidades anuales. El precio variará en función de los materiales empleados, del número de unidades anuales a fabricar y de las dimensiones de la pala. En este trabajo de fin de grado se ha realizado un estudio para un tramo de pala de 10 metros.

IV. APÉNDICES

APÉNDICES

IV. Apéndices

IV.1. REFERENCIAS

[1] La energía de uso marino y su uso potencial en Venezuela. Antonio Herrera y Amalia Quintero. https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2017/08/393-09-HERRERA-42_6.pdf

[2] Energía mareomotriz perspectiva histórica y estado actual. Juan Aurelio Montero Sousa y José Luis Calvo Rolle. <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/86/1488/a1488.pdf>

[3] Energías mareomotriz y de corrientes marinas. Turbinas submarinas de 1 MWe. Ángel Fernández Álvarez, Ingeniero naval. <https://ainaval.wordpress.com/2012/02/07/la-energia-de-las-mareas-turbinas-submarinas-de-1-mwe/>

[4] Energía mareomotriz: perspectiva histórica y estado actual. Juan Aurelio Montero Sousa y José Luis Calvo Rollé. <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/86/1488/a1488.pdf>

[5] ¿Qué es la energía undimotriz?. <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/12/que-es-la-energia-undimotriz/#more-465>

[6] https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar

[7] Perfil aerodinámico de una ala. https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar

[8] UIUC Applied Aerodynamics Group (Department of Aerospace Engineering) http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html#R

[9] Miravete de Marco, A. (2000). Materiales Compuestos. Tomo I.

[10] web of science: "Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine Blade Sections", Abdullah Muratoglu, M. Ishak Yuce.

IV. Apéndices

[11] web of science: “Optimum geometry for axial Flow free stream tidal turbine Blades”, Richard Evans, Ross McAdam, Marcus Royle, Luke McEwen.

[12] web of science: “A Method for Analysing Fluid Structure Interactions on a Horizontal Axis Tidal Turbine”, R.F. Nicholls-Lee, S.R. Turnock, S.W. Boyd.

[13] web of science: “Desing of Composite Tidal Turbine Blades”, D.M Grogan, S.B. Leen, C.R. Kennedy, C.M. Ó Brádaigh.

[14] web of science: “ A preliminary design methodology for fatigue life prediction of polymer composites for tidal turbine Blades”, Kennedy, Ciaran R, . Ó Brádaigh, Conchúr M, S.B. Leen.

[15] web of science: “Aplication of an airfoil to the Tidal turbine Design by Analyzing Two-dimensional Performance in the Water”, Chul-hee JO and Kang-hee LEE.

[16] Libros sobre ingeniería energética de Pedro Fernández Díez.
es.pfernandezdiez.es/

[17] airfoiltools.com

[18] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. BOE.es, REAL DECRETO 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. www.boe.es/boe/dias/2007/05/26/pdfs/A22846-22886.pdf

[19] Ministerio de la Presidencia. BOE.es, REAL DECRETO 1028/2007, de 20 de julio, por el que se establece el procedimiento administrativo para la tramitación de las solicitudes de autorización de instalaciones de generación eléctrica en el mar territorial. www.boe.es/boe/dias/2007/08/01/pdfs/A33171-33179.pdf

[20] El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. BOE.es, DIRECTIVA 2001/77/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de septiembre de 2001 relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad. www.boe.es/doue/2001/283/L00033-00040.pdf

IV. Apéndices

IV.1.1. Referencias a figuras.

- i. <http://huelvabuenasnoticias.com/2014/05/09/el-descubrimiento-de-las-norias-romanas-en-minas-de-riotinto/>
- ii. <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/86/1488/a1488.pdf>
- iii. <http://footage.framepool.com/es/shot/406879456-usine-maremotrice-de-la-rance-rance-bretagne-energia-hidraulica-canal-de-la-mancha>
- iv. <http://pelandintecno.blogspot.com.es/2013/03/aprovechando-las-mareas-energia.html>
- v. <https://sustentartv.com/escocia-utilizara-la-energia-mareomotriz-como-principal-fuente-de-energia/>
- vi. http://www.mutriku.eus/noticias/el-sabado-se-realizara-la-primera-visita-guiada-a-la-planta-undimotriz/view?language_sync=1
- vii. https://www.researchgate.net/figure/Oscillating-water-column-OWC-source-24_fig4_259744972
- viii. <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/12/que-es-la-energia-undimotriz/>
- ix. <http://www.telam.com.ar/notas/201706/192381-undimotriz-energia-renovable-en-la-utn-proyecto-undimotriz-haim.html>
- x. <https://www.pinterest.es/pin/125678645834516551/>
- xi. <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/6/536/htm>
- xii. <http://virutasf1.com/2013/11/viru-importancia-de-un-buen-equilibrio-aerodinamico-en-la-formula-1/>
- xiii. <http://airfoiltools.com/>
- xiv. <http://airfoiltools.com/>
- xv. http://cikguwong.blogspot.com.es/2011/07/physics-form-4-chapter-3-application-of_28.html
- xvi. <http://conocimientoelico.blogspot.com.es/2017/04/teoria-de-la-cantidad-de-movimiento.html>
- xvii. <https://hidrolate.wordpress.com/tema/>
- xviii. Ing. Mat. Compuestos de Matriz Polimérica. Dr, Rafael Balart Gimeno. Universidad Politéctica Valencia
- xix. Ing. Mat. Compuestos de Matriz Polimérica. Dr, Rafael Balart Gimeno. Universidad Politéctica Valencia
- xx. Ing. Mat. Compuestos de Matriz Polimérica. Dr, Rafael Balart Gimeno. Universidad Politéctica Valencia
- xxi. <http://airfoiltools.com/>
- xxii. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/11/moldeo-manual-de-materiales-compuestos.html>
- xxiii. <https://www.aryse.org/el-aerogenerador-con-las-palas-mas-largas-del-mund>

IV. Apéndices

IV. Apéndices

IV.2. ANEXOS.

IV.2.1. Distribución de la geometría del perfil NACA 4418.

Longitud de cuerda de 1625 mm

X	Y	Z
1625.00	3.09	0
1543.75	30.71	0
1462.50	56.23	0
1300.00	101.08	0
1137.50	138.94	0
975.00	169.65	0
812.50	192.56	0
650.00	206.38	0
487.50	207.35	0
406.25	201.50	0
325.00	190.45	0
243.75	173.23	0
162.50	148.04	0
121.88	130.98	0
81.25	109.69	0
40.63	81.25	0
20.31	61.10	0
0.00	0.00	0
20.31	-34.29	0
40.63	-48.59	0
81.25	-65.98	0
121.88	-75.89	0
162.50	-82.23	0
243.75	-89.21	0
325.00	-90.35	0
406.25	-89.21	0
487.50	-85.48	0
650.00	-76.38	0
812.50	-65.33	0
975.00	-52.65	0
1137.50	-39.81	0
1300.00	-27.14	0
1462.50	-15.11	0

IV. Apéndices

1543.75	-8.94	0
1625.00	-3.09	0

Longitud de cuerda de 1620 mm

X	Y	Z
1620	3.078	0
1539	30.618	0
1458	56.052	0
1296	100.764	0
1134	138.51	0
972	169.128	0
810	191.97	0
648	205.74	0
486	206.712	0
405	200.88	0
324	189.864	0
243	172.692	0
162	147.582	0
121.5	130.572	0
81	109.35	0
40.5	81	0
20.25	60.912	0
0	0	0
20.25	-34.182	0
40.5	-48.438	0
81	-65.772	0
121.5	-75.654	0
162	-81.972	0
243	-88.938	0
324	-90.072	0
405	-88.938	0
486	-85.212	0
648	-76.14	0
810	-65.124	0
972	-52.488	0
1134	-39.69	0
1296	-27.054	0
1458	-15.066	0
1539	-8.91	0
1620	-3.078	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 1520 mm

X	Y	Z
1520	2.888	0
1444	28.728	0
1368	52.592	0
1216	94.544	0
1064	129.96	0
912	158.688	0
760	180.12	0
608	193.04	0
456	193.952	0
380	188.48	0
304	178.144	0
228	162.032	0
152	138.472	0
114	122.512	0
76	102.6	0
38	76	0
19	57.152	0
0	0	0
19	-32.072	0
38	-45.448	0
76	-61.712	0
114	-70.984	0
152	-76.912	0
228	-83.448	0
304	-84.512	0
380	-83.448	0
456	-79.952	0
608	-71.44	0
760	-61.104	0
912	-49.248	0
1064	-37.24	0
1216	-25.384	0
1368	-14.136	0
1444	-8.36	0
1520	-2.888	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 1360 mm

X	Y	Z
1360	2.584	0
1292	25.704	0
1224	47.056	0
1088	84.592	0
952	116.28	0
816	141.984	0
680	161.16	0
544	172.72	0
408	173.536	0
340	168.64	0
272	159.392	0
204	144.976	0
136	123.896	0
102	109.616	0
68	91.8	0
34	68	0
17	51.136	0
0	0	0
17	-28.696	0
34	-40.664	0
68	-55.216	0
102	-63.512	0
136	-68.816	0
204	-74.664	0
272	-75.616	0
340	-74.664	0
408	-71.536	0
544	-63.92	0
680	-54.672	0
816	-44.064	0
952	-33.32	0
1088	-22.712	0
1224	-12.648	0
1292	-7.48	0
1360	-2.584	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 1220 mm

X	Y	Z
1220	2.318	0
1159	23.058	0
1098	42.212	0
976	75.884	0
854	104.31	0
732	127.368	0
610	144.57	0
488	154.94	0
366	155.672	0
305	151.28	0
244	142.984	0
183	130.052	0
122	111.142	0
91.5	98.332	0
61	82.35	0
30.5	61	0
15.25	45.872	0
0	0	0
15.25	-25.742	0
30.5	-36.478	0
61	-49.532	0
91.5	-56.974	0
122	-61.732	0
183	-66.978	0
244	-67.832	0
305	-66.978	0
366	-64.172	0
488	-57.34	0
610	-49.044	0
732	-39.528	0
854	-29.89	0
976	-20.374	0
1098	-11.346	0
1159	-6.71	0
1220	-2.318	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 1080 mm

X	Y	Z
1080	2.052	0
1026	20.412	0
972	37.368	0
864	67.176	0
756	92.34	0
648	112.752	0
540	127.98	0
432	137.16	0
324	137.808	0
270	133.92	0
216	126.576	0
162	115.128	0
108	98.388	0
81	87.048	0
54	72.9	0
27	54	0
13.5	40.608	0
0	0	0
13.5	-22.788	0
27	-32.292	0
54	-43.848	0
81	-50.436	0
108	-54.648	0
162	-59.292	0
216	-60.048	0
270	-59.292	0
324	-56.808	0
432	-50.76	0
540	-43.416	0
648	-34.992	0
756	-26.46	0
864	-18.036	0
972	-10.044	0
1026	-5.94	0
1080	-2.052	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 960 mm

X	Y	Z
960	1.824	0
912	18.144	0
864	33.216	0
768	59.712	0
672	82.08	0
576	100.224	0
480	113.76	0
384	121.92	0
288	122.496	0
240	119.04	0
192	112.512	0
144	102.336	0
96	87.456	0
72	77.376	0
48	64.8	0
24	48	0
12	36.096	0
0	0	0
12	-20.256	0
24	-28.704	0
48	-38.976	0
72	-44.832	0
96	-48.576	0
144	-52.704	0
192	-53.376	0
240	-52.704	0
288	-50.496	0
384	-45.12	0
480	-38.592	0
576	-31.104	0
672	-23.52	0
768	-16.032	0
864	-8.928	0
912	-5.28	0
960	-1.824	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 900 mm

X	Y	Z
900	1.71	0
855	17.01	0
810	31.14	0
720	55.98	0
630	76.95	0
540	93.96	0
450	106.65	0
360	114.3	0
270	114.84	0
225	111.6	0
180	105.48	0
135	95.94	0
90	81.99	0
67.5	72.54	0
45	60.75	0
22.5	45	0
11.25	33.84	0
0	0	0
11.25	-18.99	0
22.5	-26.91	0
45	-36.54	0
67.5	-42.03	0
90	-45.54	0
135	-49.41	0
180	-50.04	0
225	-49.41	0
270	-47.34	0
360	-42.3	0
450	-36.18	0
540	-29.16	0
630	-22.05	0
720	-15.03	0
810	-8.37	0
855	-4.95	0
900	-1.71	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 800 mm

X	Y	Z
800	1.52	0
760	15.12	0
720	27.68	0
640	49.76	0
560	68.4	0
480	83.52	0
400	94.8	0
320	101.6	0
240	102.08	0
200	99.2	0
160	93.76	0
120	85.28	0
80	72.88	0
60	64.48	0
40	54	0
20	40	0
10	30.08	0
0	0	0
10	-16.88	0
20	-23.92	0
40	-32.48	0
60	-37.36	0
80	-40.48	0
120	-43.92	0
160	-44.48	0
200	-43.92	0
240	-42.08	0
320	-37.6	0
400	-32.16	0
480	-25.92	0
560	-19.6	0
640	-13.36	0
720	-7.44	0
760	-4.4	0
800	-1.52	0

IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 750 mm

X	Y	Z
750	1.425	0
712.5	14.175	0
675	25.95	0
600	46.65	0
525	64.125	0
450	78.3	0
375	88.875	0
300	95.25	0
225	95.7	0
187.5	93	0
150	87.9	0
112.5	79.95	0
75	68.325	0
56.25	60.45	0
37.5	50.625	0
18.75	37.5	0
9.375	28.2	0
0	0	0
9.375	-15.825	0
18.75	-22.425	0
37.5	-30.45	0
56.25	-35.025	0
75	-37.95	0
112.5	-41.175	0
150	-41.7	0
187.5	-41.175	0
225	-39.45	0
300	-35.25	0
375	-30.15	0
450	-24.3	0
525	-18.375	0
600	-12.525	0
675	-6.975	0
712.5	-4.125	0
750	-1.425	0

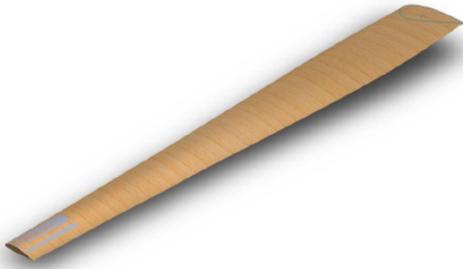
IV. Apéndices

Longitud de cuerda de 680 mm

X	Y	Z
680	1.292	0
646	12.852	0
612	23.528	0
544	42.296	0
476	58.14	0
408	70.992	0
340	80.58	0
272	86.36	0
204	86.768	0
170	84.32	0
136	79.696	0
102	72.488	0
68	61.948	0
51	54.808	0
34	45.9	0
17	34	0
8.5	25.568	0
0	0	0
8.5	-14.348	0
17	-20.332	0
34	-27.608	0
51	-31.756	0
68	-34.408	0
102	-37.332	0
136	-37.808	0
170	-37.332	0
204	-35.768	0
272	-31.96	0
340	-27.336	0
408	-22.032	0
476	-16.66	0
544	-11.356	0
612	-6.324	0
646	-3.74	0
680	-1.292	0

IV. Apéndices

IV.2.2. Propiedades volumétricas de la pala.



Nombre del modelo: Pala
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 Recubrir5	Sólido	Masa: 279.361 kg Volumen: 1.74612 m ³ Densidad: 159.99 kg/m ³ Peso: 2737.74 N	D:\Pala.SLDPRT Apr 26 18:40:35 2018
Sólidos compuestos			
Nombre de documento y referencia	Propiedades		



Superficie-Equidistancia1

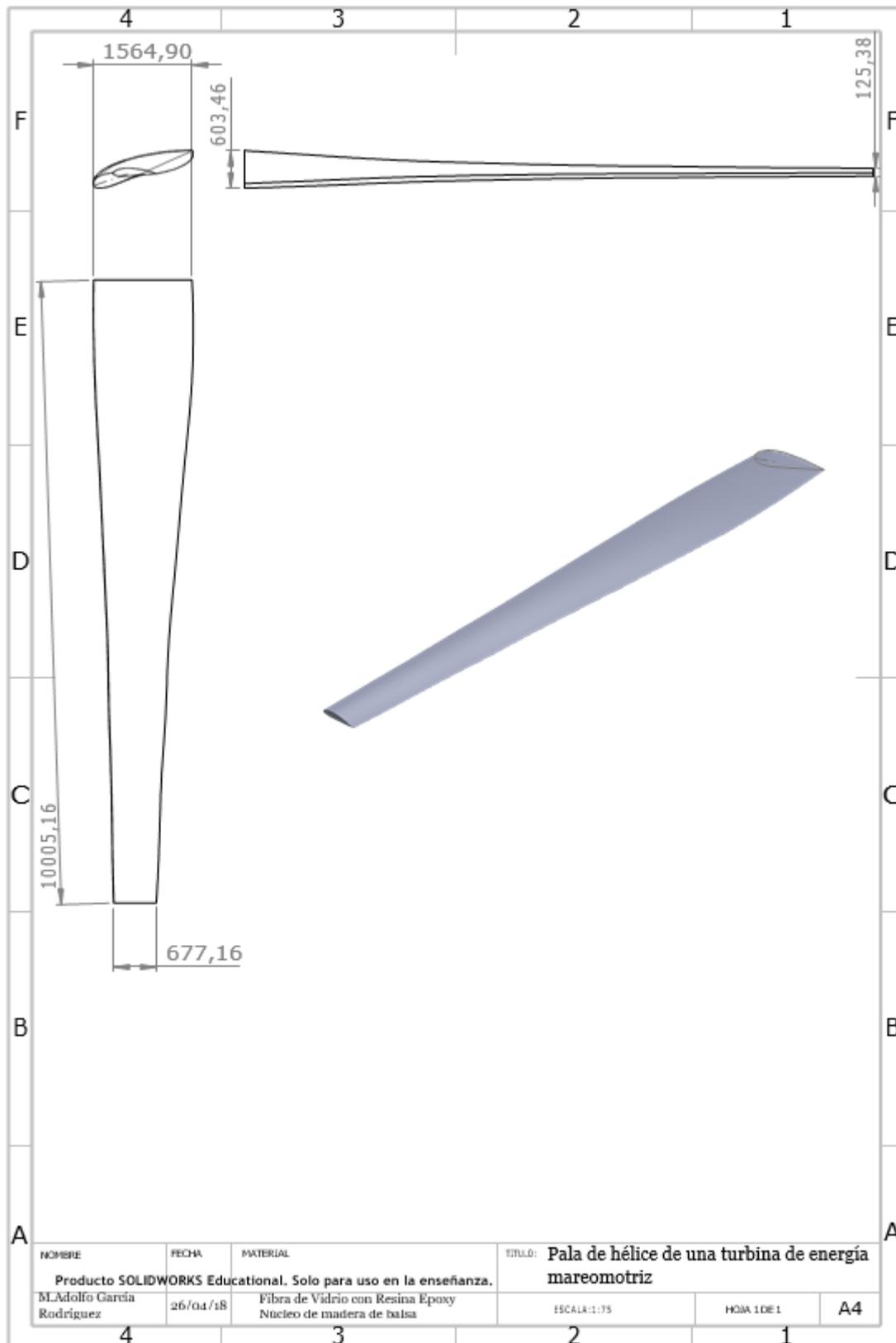
Número total de pliegues: 8
Simétrico: Sí

Pliegue	Espesor (mm)	Ángulo (deg)	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Masa (kg)	Peso (N)
1	0.25	45	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687
2	0.25	-45	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687
3	0.25	0	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687
4	0.25	90	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687
5	0.25	90	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687
6	0.25	0	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687
7	0.25	-45	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687
8	0.25	45	24.2321	0.00605803	1000	6.05803	59.3687

Nombre de documento: D:\Pala.SLDPRT
Fecha de modificación: Apr 26 18:40:35 2018

IV.3. PLANOS ACOTADOS.

IV. Apéndices



IV. Apéndices

IV. Apéndices
