



CONAHCYT

CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA MECÁNICA**

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Mecánica

TESIS

**SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ENSAYOS ESTRUCTURALES
CON DISPOSITIVO FISHBAC DE ÁLABES DE UNA
TURBINA DE VIENTO DE BAJA CAPACIDAD
EMPLEANDO LA NORMA IEC 61400-2**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:
M. C. PAULINA MARIN TELLEZ**

**ASESORES:
DR. VÍCTOR LÓPEZ GARZA
DR. JUAN FELIPE SORIANO PEÑA**

MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO DEL 2025

Dedicatorias

Si tu no brillas,
Si yo no brillo,
si nosotros no brillamos...
¿quién iluminara esta oscuridad?

Dedico esta tesis a mi familia:
A mi hija, mi corazón.
A mi esposo, mi compañero de vida.
A mi hermano, mi apoyo incondicional.
A mi papá, mi ejemplo y guía.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por todo su apoyo: a mi hermano, por su ayuda en las simulaciones, soporte técnico, manejo de software y sus palabras de aliento; a mi esposo, que maquinó los moldes y me apoyó con las pruebas estáticas; y a mi papá, por su respaldo constante.

A mis asesores, principalmente al Dr. Víctor por los recursos brindados para el desarrollo del proyecto, y al Dr. Juan Felipe, por su acompañamiento constante y retroalimentación. También agradezco a los doctores Issac, Erasmo y Gildardo.

A SECIHTI, por la beca otorgada que hizo posible mi dedicación al proyecto; a CIATEQ, por permitirme realizar una estancia de investigación, especialmente a Rafael; a Reparaciones Industriales, por permitirme maquinar los moldes; y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Resumen

La presente investigación tiene como objeto mostrar el análisis estructural de un álabe con dispositivo FishBAC de una turbina de viento de baja capacidad empleando la norma IEC 61400-2. El dispositivo FishBAC permite modificar la curvatura del borde de salida del perfil aerodinámico, lo que se traduce en un aumento de la potencia en un 15%.

En el diseño aerodinámico se aplicó la teoría BEM y se validó mediante el modelado en el software QBlade y empleando simulación CFD. El diseño mecánico siguió la metodología de Ullman. También se realizó una simulación estructural del modelo del álabe.

Se muestra el proceso de manufactura del álabe, tanto para los materiales compuestos (fibra de vidrio y resina epoxi) mediante el proceso VARTM, como para los componentes por impresión 3D. Se realizaron pruebas estáticas de acuerdo con las cargas indicadas en la norma IEC 60400-2.

Finalmente, se compararon los resultados obtenidos de la experimentación y los obtenidos mediante simulación numérica. Aunque se observaron discrepancias en la comparación de resultados, estas no comprometen la integridad estructural del álabe. Los resultados validan el diseño presentado y el proceso de manufactura.

Palabras clave: álabe, medición, simulación, turbina eólica, manufactura.

Abstract

The purpose of this research is to present the structural analysis of a blade fitted with a FishBAC device for a low-capacity wind turbine using the IEC 61400-2 standard. The FishBAC device allows the curvature of the trailing edge of the airfoil to be modified, resulting in a $15\% \pm 1\%$ increase in power.

BEM theory was applied to aerodynamic design and validated through modeling in QBlade software and CFD simulation. The mechanical design followed the Ullman methodology. A structural simulation of the blade model was also performed.

The blade manufacturing process is shown, both for the composite materials (fiberglass and epoxy resin) using the VARTM process, and for the 3D-printed components. Static tests were performed according to the loads specified in the IEC 60400-2 standard.

Finally, the results obtained from the experiments and those obtained through numerical simulation were compared. Although discrepancies were observed in the comparison of results, these do not compromise the structural integrity of the blade. The results validate the presented design and manufacturing process.

Keywords: blade, measurement, simulation, wind turbine, manufacture.

Índice

Dedicatorias	1
Agradecimientos.....	2
Resumen	3
Abstract	4
Nomenclatura	8
Introducción.....	10
Planteamiento del problema.....	11
Antecedentes	12
Justificación.....	18
Hipótesis.....	19
Objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos	20
Metodología.....	21
1.1. Modelo del elemento álabe (BEM)	24
1.2.1 Diseño óptimo para operación de velocidad variable	27
1.2.2 Factor de pérdida de Prandtl	28
1.3 Metodología de diseño aerodinámico.....	28
1.4 Diseño aerodinámico. Teoría BEM.....	29
1.5 Software Qblade.....	30
1.6 Ángulo óptimo del dispositivo FishBAC	32
Capítulo 2. Diseño mecánico del dispositivo FishBAC	36
2.1 Metodologías de diseño	36
2.2 Metodología de Ullman	38
2.3 Etapa 1. Descubrimiento del producto	41
2.4 Etapa 2. Planificación del proyecto	41
2.5 Etapa 3. Definición del producto.....	41
2.6 Etapa 4. Diseño conceptual.....	48
2.7 Cálculo de cargas para el mecanismo FishBAC	58
2.8 Selección de componentes	59
Capítulo 3. Simulación numérica.....	61
Parte I. Simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	61
3.1 Simulación CFD del rotor de una turbina eólica de 2400 W	61

3.2. Malla del rotor y estator de 2400 W	64
3.3 Condiciones físicas	69
3.3.1 Configuración del solucionador	72
3.4 Solución.....	73
3.5 Resultados	74
Parte II. Simulación estructural de álabes mediante elemento finito	75
3.6 Metodología de simulación estructural	75
3.7 Cargas de diseño para aerogeneradores pequeños	76
3.7.1 Sistema de ejes de un aerogenerador pequeño de eje horizontal	76
3.7.2 Hipótesis de carga para el método de cargas simplificadas.....	77
3.8 Modelo 3D	79
3.9 Material.....	80
3.10 Malla.....	80
3.11 Módulo para materiales compuestos (ACP)	82
3.12 Condiciones de frontera	83
3.13 Análisis de convergencia de malla	84
3.14 Resultados de la simulación numérica.	85
3.14.1 Desplazamiento total.....	85
3.14.2 Desplazamiento direccional.....	86
3.14.3 Esfuerzo de Von Mises.....	87
3.14.4 Criterio de fallo	88
Capítulo 4. Manufactura del álabe con FishBAC.....	90
Parte I. Manufactura con materiales compuestos	90
4.1. Introducción.....	90
4.2 Metodología de manufactura VARTM	92
4.3 Pruebas de manufactura	95
4.4 Manufactura del álabe por VARTM	102
Parte II. Manufactura en impresión 3D	112
4.5. Introducción a la manufactura aditiva	112
4.5.1 FFF (Fused Filament Fabrication)	113
4.5.2 Parámetros de impresión 3D	114
4.5.3 Materiales para impresión 3D.....	115
4.6 Prototipado del FishBAC	116
Capítulo 5. Pruebas estáticas.....	120

5.1 Galgas extensométricas	120
5.2 Instrumentación del álabe	121
5.2.1 Instalación de las galgas extensométricas	122
5.3 Pruebas estáticas	126
5.4 Resultados de las pruebas estáticas	127
5.5 Resultados experimentales vs simulación numérica	129
Conclusiones	131
Recomendaciones	132
Referencias	133

Nomenclatura

a	Factor de inducción axial	[-]
a'	Factor de inducción radial	[-]
A	Área de la sección transversal del aerogenerador	[m ²]
$A_{proj,B}$	Área del álabes proyectada	[m ²]
A_r	Área de la sección transversal en el rotor	[m ²]
A_0	Área de la sección transversal corriente arriba	[m ²]
A_2	Área de la sección transversal corriente abajo	[m ²]
b	Factor de inducción del flujo tangencial	[-]
B	Número de palas	[-]
c	Cuerda	[m]
C_d	Coeficiente de resistencia	[-]
C_f	Coeficiente de empuje	[-]
C_l	Coeficiente de sustentación	[-]
$C_{l,max}$	Máximo coeficiente de sustentación	[-]
C_p	Coeficiente de potencia	[-]
C_T	Coeficiente de empuje	[-]
C_x	Coeficiente de fuerza de la sección del álabes normal al plano del rotor	[-]
C_y	Coeficiente de fuerza de la sección del álabes paralelo al plano del rotor	[-]
D	Arrastre	[-]
E	Energía cinética del viento	[J]
$\dot{E}$	Potencia	[W]
F	Fuerza	[N]
F_r	Fuerza radial	[N]
F_t	Fuerza tangencial	[N]
F_x	Fuerza axial	[N]
$F_{x-shaft}$	Carga mecánica en la dirección del eje axial	[N]
F_{zB}	Fuerza sobre la pala en la raíz de la pala en la dirección de envergadura	[N]
g	Aceleración de la gravedad (9.81)	[m/s ²]
I_B	Momento de inercia del álabes sobre el eje de pandeo de la raíz del álabes	[kgm ²]
K	Factor de galga extensométrica	[-]
L	Sustentación	[-]
L_{rt}	Distancia entre el centro del rotor y el eje de orientación	[m]
m	Masa	[kg]
m_B	Masa de la pala	[kg]
M_r	Momento de flexión en el plano de rotación a lo largo de la dirección tangencial	[Nm]
M_t	Momento de torsión a lo largo del eje longitudinal del álabes	[Nm]
M_x	Momento de flexión a lo largo del eje de rotación	[Nm]
M_{xB}	Momento flector en la raíz de la pala en la dirección x	[Nm]
$M_{x-shaft}$	Momento de torsión en el eje del rotor en el primer rodamiento	[Nm]
M_{yB}	Momento flector en la raíz de la pala en la dirección y	[Nm]
$\dot{m}$	Flujo masico de aire	[kg/s]
$\dot{m}_0$	Flujo masico de aire corriente arriba	[kg/s]
$\dot{m}_2$	Flujo masico de aire corriente abajo	[kg/s]
N	Número de álabes	[-]
P	Potencia	[W]
p_r^0	Presión detrás del rotor	[Pa]
p_r^2	Presión frente al rotor	[Pa]
Q	Torque	[N]
Q_{design}	Par del eje de diseño	[Nm]
r	Radio	[m]

R	Radio del rotor	[m]
R	Resistencia	[Ω]
R_{cog}	Distancia radial entre el centro de gravedad de la pala y el centro del rotor	[m]
T	Empuje	[N]
v	Velocidad del aire	[m/s]
v_r	Velocidad del viento en el rotor	[m/s]
v_{res}	Velocidad resultante	[m/s]
v_t	Velocidad tangencial	[m/s]
v_0	Velocidad del viento corriente arriba	[m/s]
v_1	Velocidad axial	[m/s]
v_2	Velocidad del viento corriente abajo	[m/s]
v_0	Velocidad del viento corriente arriba	[m/s]
V_{ave}	Velocidad del viento media anual a la altura del buje	[m/s]
V_{e50}	Valor extremo de la velocidad en 50 años	[m/s]
V_s	Voltaje de alimentación	[V]
V_0	Voltaje de salida	[V]
α	Ángulo de ataque	[grados]
β	Ángulo de asiento, de paso o de pitch	[grados]
γ	Ángulo de guiñada	[grados]
ε	Deformación	[m]
ε	Eficiencia	[-]
λ	Relación de velocidad	[-]
λ_{design}	Relación de velocidad en la punta de la pala de diseño	[-]
λ_r	Relación de velocidad local o velocidad específica local	[-]
μ	Viscosidad dinámica	[kg/m s]
ρ	Densidad del aire, 1.225	[kg/m ³]
P	Presión estática	[Pa]
σ	Solidez	[-]
σ_{1T}	Resistencia a la tracción en la dirección longitudinal	[Pa]
σ_{1C}	Resistencia a la compresión en la dirección longitudinal	[Pa]
σ_{2T}	Resistencia a la tracción en la dirección transversal	[Pa]
σ_{2C}	Resistencia a la compresión en la dirección transversal	[Pa]
σ_{3T}	Resistencia a la tracción en la dirección z	[Pa]
σ_{3C}	Resistencia a la compresión en la dirección z	[Pa]
τ_{12F}	Resistencia al cortante en el plano xy	[Pa]
τ_{13F}	Resistencia al cortante en el plano xz	[Pa]
τ_{23F}	Resistencia al cortante en el plano yz	[Pa]
ϕ	Ángulo de flujo	[grados]
ω	Velocidad de rotación del rotor	[rad/s]
$\omega_{n,design}$	Velocidad de rotación del rotor de diseño	[rad/s]
$\omega_{yaw,m\acute{a}x}$	Velocidad de orientación máxima	[rad/s]
Ω	Velocidad anular	[rad/s]
Subíndices		
x	En la dirección del eje x	
y	En la dirección del eje y	
z	En la dirección del eje z	
B	Álabe	

Introducción

La generación de electricidad mediante fuentes de energía renovable ofrece múltiples beneficios como competitividad en sus costos, mejora de la salud pública a través de la reducción de la contaminación, mayor confiabilidad y creación de empleo [1].

En 2023, se agregaron 473 GW de nueva capacidad de energía renovable, 346.9 GW en energía solar fotovoltaica, 114.5 GW de energía eólica (103.9 GW terrestre), 6.6 GW de energía hidroeléctrica (excluida la bombeada) y 5.2 GW de bioenergía, geotermia, CSP y energía marina en conjunto [2, 3].

Además, en ese año, se registró el mayor número de nuevas instalaciones de energía eólica terrestre en la historia (50% más con respecto al año anterior) y el segundo mayor número de instalaciones de energía eólica marina (11 GW). Logrando superar la marca de 1 TW instalado a nivel mundial y, se prevé que se continúe con el mismo ritmo de crecimiento para alcanzar los 2 TW antes de 2030. Sin embargo, este crecimiento se ha concentrado excesivamente en China, la UE, los EE. UU., India y Brasil [3, 4].

Durante la Conferencia de las Partes 28 (COP28) se establecieron los objetivos de triplicar la energía renovable a nivel mundial y duplicar las mejoras de eficiencia energética para 2030, lo cual, coloca a la industria de la energía eólica ante una oportunidad y un desafío únicos. De acuerdo con el Informe mundial sobre energía eólica del 2024, se deben aumentar las instalaciones de energía eólica de 117 GW en 2023 a 320 GW de instalaciones anuales para 2030, como mínimo. Esta triplicación de las instalaciones eólicas anuales sumaría un total de casi 3 TW de capacidad de energía eólica acumulativa [4].

Cambiar la curvatura del borde de salida en un perfil aerodinámico es una forma eficaz de controlar la sustentación y el arrastre, también mejora la eficiencia del perfil aerodinámico. En la literatura, se han propuesto varios métodos de transformación de la curvatura a lo largo de los años y uno de los mecanismos más simples para cambiar la curvatura de un perfil aerodinámico es emplear aletas de borde de fuga, sin embargo, estos lo hacen de una manera brusca, repentina y discontinua [5].

Una alternativa a los dispositivos tradicionales de cambio de curvatura es el dispositivo Fish Bone Active Camber (FishBAC), el cual permite realizar los cambios de una manera suave y continua. En los últimos años ha habido un interés considerable debido a la necesidad de desarrollar dispositivos más eficientes y silenciosos, pero también a los avances en materiales inteligentes y estructuras compuestas. Lo cual ha permitido superar los principales problemas que tenían los conceptos iniciales de curvatura variable: mecanismos pesados y complejos que reducían los beneficios [6].

Planteamiento del problema

Una forma común de modificar las características de sustentación de un perfil aerodinámico para operación a baja velocidad es usar dispositivos de borde de salida que pivoten o se deslicen hacia afuera hasta una posición desplegada. Con muchos de estos dispositivos, existe el problema de que durante el despliegue se interrumpe el flujo de aire uniforme sobre la superficie aerodinámica. Además, muchos de estos dispositivos no pueden desplegarse en posiciones intermedias [48].

Por lo anterior es necesario implementar una solución que permita el cambio de curvatura de perfil de forma suave y controlada, los dispositivos FishBAC son una opción en aplicación para álabes de turbinas eólicas.

Sin embargo, las deflexiones logradas con los dispositivos de cambio de curvatura como lo es el FishBAC, en el borde de salida son grandes, por lo que el acoplamiento entre las cargas aerodinámicas y estructurales es fuerte [7].

Por último, los álabes en las turbinas eólica son componentes clave; la fatiga en estos puede generar problemas que disminuyan el rendimiento del aerogenerador, acelerando su proceso de degradación y disminuyendo su eficiencia en la producción de energía. También pueden provocar graves accidentes, la mayoría de los accidentes en los parques eólicos se deben a fallas en las palas, con una tasa de fracaso de 1:184. [8, 9].

Por lo anterior es necesario realizar pruebas estructurales para verificar que los álabes con dispositivo FishBAC no fallaran por daños causados dentro de la vida útil planificada de acuerdo con las normas de seguridad para aerogeneradores.

Antecedentes

Aeronaves

Rivero et al. [10] muestran el proceso de fabricación de un dispositivo FishBAC con aplicación en aeronaves, así como la caracterización de los materiales y actuadores y un estudio del mecanismo de actuación. Se seleccionó un perfil NACA 23012 con una longitud de cuerda de 270 mm y una longitud de 1m. Para la fabricación se emplearon diversos materiales como fibra de carbono, plástico 3D, silicona, fibra de kevlar y aluminio; se presenta la caracterización de los tres primeros materiales. Se emplearon distintas técnicas de manufactura para cada material y se utilizaron cuatro servoactuadores para modificar la curvatura del dispositivo FishBAC.

Las pruebas las realizaron en un túnel de viento a una velocidad constante de flujo libre de 30 m/s y el ángulo de ataque se aumentó gradualmente hasta 14° . Con un sistema de medición de video de seguimiento de puntos de dos cámaras se midió el desplazamiento transversal del FishBAC durante el accionamiento a lo largo del borde de salida y en uno de los extremos de la cuerda. Este trabajo muestra resultados del comportamiento estructural del álabe bajo las cargas de los actuadores, sin embargo, no contempla las cargas aerodinámicas sobre el dispositivo ni la seguridad de su funcionamiento bajo la acción de estas.

Huntley et al. [11] comparan las aletas de borde de fuga versus los dispositivos FishBAC mediante un análisis de dinámica de fluidos computacional (empleando el software DLR-TAU) y por medio del código de método del panel XFOIL. Se estudiaron perfiles de la serie NACA incluyendo el 0009, 0012, 0015, 2412 y el 3415 en configuración sin deformar, con curvatura variable y con aletas. Los perfiles aerodinámicos se analizaron en distintas combinaciones de ángulo de ataque, número de Reynolds, deflexión de curvatura y extensión de FishBAC en sentido de la cuerda; los resultados mostraron que el dispositivo FishBAC proporciona una gran autoridad de control, baja penalización de arrastre y relaciones de sustentación a arrastre significativamente mejores en una amplia gama de perfiles aerodinámicos y condiciones de operación en comparación con los perfiles aerodinámicos sin deformación y con aletas. Este trabajo muestra resultados de simulación computacional, no obstante, es necesario realizar pruebas de laboratorio que corroboren la validez de los resultados en condiciones reales de funcionamiento y bajo cargas aerodinámicas para garantizar la seguridad del funcionamiento de estos dispositivos en operación.

Finchman y Friswell [12], desarrollaron la optimización aerodinámica de un perfil con dispositivo FishBAC con aplicación en aeronaves. Emplearon una serie de puntos en matrices para definir la superficie aerodinámica del perfil probando diferentes densidades de puntos. Aplicaron un algoritmo genético empleando el software Python, mientras que para el solucionador aerodinámico se utilizó XFOIL, un método de panel 2D con solucionador de capa límite acoplado. Se empleó un perfil NACA 0012 y las condiciones de vuelo evaluadas fueron dos; la primera con un número de Reynolds $6.5E5$ y Mach 0.1, la segunda con un número de Reynolds

2.5E6 y Mach 0.8417. Además, compararon un perfil sin dispositivo FishBAC versus uno con el dispositivo. Concluyendo que el dispositivo FishBAC proporciona una gran mejora en el rendimiento de hasta un 30%. Este artículo valida que el dispositivo FishBAC mejora el rendimiento significativamente y presenta una optimización aerodinámica, sin embargo, el enfoque es en aplicaciones de aeronaves. Es necesario desarrollar el proceso partiendo del diseño aerodinámico para una aplicación diferente como las turbinas eólicas debido a que las fuerzas y condiciones de funcionamiento son muy diferentes.

Zhang et al. [13], realizaron un modelo aerolástico para un ala de una aeronave con dispositivo FishBAC. El perfil que emplearon fue el NACA 0012, con un larguero en D y una estructura de inspiración biológica. A partir de la ecuación de Rayleigh modelaron un perfil aerodinámico con dispositivo FishBAC y consideraron dos modelos aerodinámicos lineales: uno cuasi-estable y uno completamente inestable. Se evaluaron ambos modelos con el 25% y el 75% del porcentaje de cuerda para el dispositivo FishBAC y variaron la rigidez del perfil. Concluyendo que el modelo aerodinámico cuasi-estable da una predicción demasiado conservadora de la velocidad de aleteo y que el modelo aerodinámico inestable reduce el movimiento de la estructura. Además de que las características del dispositivo FishBAC influyen en la estabilidad del perfil aerodinámico, modificando la rigidez, la velocidad crítica y la frecuencia natural estructural. Esta investigación presenta un análisis del comportamiento aerolástico de un perfil rígido-flexible, sin embargo, en el caso de las turbinas eólicas es necesario considerar las condiciones de operación propias de esta ampliación; así como realizar un estudio del comportamiento estructural atendiendo la normativa vigente.

Drones

Werter et al. [14] proponen un diseño de un ala capaz de variar su curvatura además de una baja rigidez a la torsión para las alas de un UAV (drones) de 25 kg. Seleccionaron los perfiles aerodinámicos NACA 2510, 3510 y 6510 y los modelaron en el software XFOIL para obtener las distribuciones de presiones. Fabricaron el ala en fibra de vidrio y aluminio. Realizaron una simulación numérica en Abacus FEM para evaluar la transferencia de carga desde la piel a través de la nervadura del borde de ataque hasta el larguero auxiliar. Además, realizaron pruebas en un túnel de viento octogonal de 2.8m a velocidades de 15 m/s y 28 m/s variando el ángulo de ataque de -5° a 10° ; para medir las fuerzas y momentos aerodinámicos emplearon una balanza aerodinámica de 6 componentes y un sistema DTC Initium de Measurement Specialties. Concluyeron que la comparación entre las simulaciones numéricas y los resultados experimentales muestra una buena concordancia y los resultados muestran beneficios del concepto actual para la deformación de curvatura y torsión. Esta investigación es referente a un dispositivo FishBAC con aplicación en el ala de un dron y aunque el concepto de un dispositivo FishBAC es el mismo, la aplicación es diferente entre esta investigación y para una turbina eólica, en la cual se deben considerar las fuerzas aerodinámicas producidas durante el funcionamiento real para garantizar la seguridad durante su funcionamiento.

Woods et al. [7] realizaron un análisis de la interacción fluido /estructural para un dispositivo FishBAC bajo cargas aerodinámicas con aplicación en un UAV (drones). Seleccionaron un perfil NACA 0012 con una cuerda de 305 mm y el diseño del dispositivo consta de una columna delgada que se dobla en forma de cuerda con largueros que se ramifican para conectarla a una superficie de piel elastómera, los actuadores se encuentran montados sobre un larguero y conectados a una polea. Realizaron pruebas en un túnel de viento a 20 m/s y con un ángulo de ataque de 0° mostrando que el dispositivo FishBAC tuvo un aumento en la relación sustentación / arrastre del 25 % comparación con los dispositivos tradicionales. El modelo analítico estructural que usaron se basa en la teoría de vigas de Euler-Bernoulli y para la distribución de la presión aerodinámica emplearon el software Xfoil con una velocidad de viento de 20 m/s, un número de Reynolds de 240,000, un ángulo de ataque de 0° y una variación del ángulo de la polea de 0° a 50° . Llevaron a cabo una serie de pruebas experimentales del dispositivo con piel y sin piel en cuatro configuraciones: carga en la punta, momento flexionante, pendiente y desplazamiento y realizaron un análisis de elementos finitos en el software Abaqus. Concluyendo que los máximos desplazamientos se dan con el máximo ángulo de la polea y que la respuesta experimental es lineal a pesar de las deflexiones de la punta (hasta el 20% de la longitud en voladizo); además de que, si bien la piel aumenta significativamente la rigidez de la estructura, no hace que su respuesta sea significativamente menos lineal. Esta investigación muestra el diseño aerodinámico con aplicación en un dron y muestra los resultados experimentales de pruebas con cargas aerodinámicas, sin embargo, para la aplicación en una turbina eólica los parámetros son diferentes y con ello las fuerzas de los actuadores y aerodinámicas; por lo que es importante realizar las pruebas estructurales que garanticen su funcionamiento seguro atendiendo las condiciones y configuraciones marcados por las normas para aerogeneradores.

Soni et al. [15] investigaron como la variación de la curvatura en un perfil aerodinámico mejora la relación sustentación / arrastre empleando un dispositivo FishBAC con aplicación en un UAV (drones). Seleccionaron un perfil NACA 0012 con un número de Reynolds de 1000, un número de Match de 0.1 y un ángulo de ataque de 5° a -5° . Las variables que eligieron para optimizar fueron la deflexión en el borde de salida y el ángulo de cambio en la curvatura, seleccionaron tres funciones objetivo-dependientes de la relación sustentación / arrastre y emplearon el software REACTMB para resolverlas. Concluyeron que las funciones de optimización proporcionaron una cinemática para FishBAC que mejoró la generación de sustentación para un ciclo de aleteo hasta 25,98% y la relación sustentación / arrastre hasta 28%, con respecto al caso no transformado. Este trabajo tiene aplicación en las alas de un dron, si bien se trata del mismo concepto de un dispositivo FishBAC la aplicación difiere en una turbina eólica. Presenta los resultados de una simulación numérica por CFD y es necesario realizar pruebas físicas para corroborar los datos de la simulación y para garantizar la seguridad del aerogenerador durante su funcionamiento.

Piel

Navaratne et al. [16] desarrollaron y realizaron pruebas para una piel corrugada con aplicación en perfiles aerodinámicos FishBAC. Seleccionaron paneles corrugados y los evaluaron a tracción y flexión mediante elemento finito tanto en MATLAB como en ABAQUS. Simularon un perfil NACA 0012 con una cuerda máxima de 305 mm a una velocidad de 30 m/s en el software XFOIL y en FishBAC con distintas pieles corrugadas. Fabricaron el molde inferior mediante impresión 3D y el superior en goma de silicona, el álabe final se fabricó mediante infusión al vacío con láminas de kevlar y resina epoxi. Finalmente, realizaron ensayos de tracción estándar en las muestras de la piel corrugada propuesta para evaluar las características del material. En este trabajo se centran en la piel que recubre el álabe y como el mismo trabajo indica el siguiente paso sería evaluar la estructura completa bajo las cargas de actuación y aerodinámicas para después validar los modelos numéricos.

Dhileep et al. [5] realizaron un estudio numérico de las características de un dispositivo FishBAC con una piel corrugada simple y con una piel corrugada doble. Eligieron un perfil aerodinámico NACA 0012 y se reconstruye por el método RBF. El análisis aerodinámico se hizo en Xfoil, OpenFOAM y ANSYS-Fluent, para una velocidad de 14.6 m/s, un número de Reynolds de 10^6 y un ángulo de ataque de -16° a 14° . Los resultados entre Xfoil y software de CFD difieren debido a los modelos que emplean, siendo más precisas en Xfoil para valores más bajos del coeficiente de sustentación / arrastre. Los álabes con una piel corrugada simple y una piel corrugada doble mostraron características aerodinámicas casi idénticas para el mismo ángulo de variación; por lo que la elección del mecanismo dependerá de requisitos estructurales. Esta investigación presenta los resultados de las simulaciones numéricas, sin embargo, es necesario realizar pruebas estructurales para garantizar el funcionamiento seguro de los álabes durante su vida útil.

Turbinas eólicas

Pohl et al. [17] realizaron el diseño aerodinámico, la fabricación y pruebas de laboratorio para un álabe FishBAC. En el diseño del álabe se empleó un perfil aerodinámico DU 91-W2-250 con una cuerda máxima de 1m y una envergadura de 2 m, se fabricó en fibra de vidrio cubierta con una piel de elastómero. Para la simulación se creó el modelo estructural y se calculó, en ANSYS: la desviación inducida por el actuador y la distribución de presión del borde de fuga desviado en XFOIL para calcular la desviación resultante por presiones aerodinámicas; finalmente se realizó la comparación de la geometría de la superficie aerodinámica deformada. Para validar los modelos de elementos finitos se mide el desplazamiento del borde de fuga flexible a 10° utilizando un método de reconocimiento de patrones con un sistema GOM ARAMIS TM y con la ayuda de galgas extensométricas. Encontrando una buena correlación entre los resultados de las simulaciones y de las mediciones. Si bien este trabajo presenta los resultados de mediciones de la deformación sufrida por el álabe en el borde de fuga flexible no se realizan mediciones bajo las cargas aerodinámicas de funcionamiento real del aerogenerador que garantice la seguridad del funcionamiento del dispositivo.

Woods et al. [18], presentan pruebas experimentales sobre la aerodinámica del dispositivo FishBAC aplicable a aeronaves, turbinas eólicas, helicópteros, turbinas mareomotrices, drones, etc. Emplearon un perfil NACA 0012 con un larguero rígido en D, una cuerda máxima de 0.305m y 0.15m de largo. El perfil se fabricó mediante impresión 3D en plástico ABS, y la piel se fabricó con un proceso de laminación con silicona y fibra de carbono unidireccional. El mecanismo del dispositivo FishBAC incluyó principalmente una polea conectada directamente a un motor eléctrico comercial. Las pruebas aerodinámicas se llevaron a cabo en un túnel de viento de sección de prueba cerrada, de circuito abierto y de baja velocidad. Emplearon un sistema compacto de adquisición de datos (cDAQ) de National Instruments (NI) y una computadora con el software NI LabVIEW. La velocidad del túnel de viento fue de 20 m/s, para un Reynolds de $3.9E5$, el ángulo de ataque se varió de 0° a 45° con incrementos de 5° . Los autores concluyeron que para un ángulo de ataque el dispositivo FishBAC genera un coeficiente de sustentación máximo de 1.07, además de que este dispositivo genera un aumento en las fuerzas de arrastre. La relación de sustentación/arrastre del perfil aerodinámico FishBAC es menos sensible al ángulo de ataque y muestra un notable aumento en la relación de sustentación a arrastre del 20% - 25% en comparación con el perfil aerodinámico aleteado sobre el rango de ángulos de ataque típico de ala fija y aplicaciones de ala giratoria. El presente trabajo muestra los resultados de las pruebas experimentales en un túnel de viento para un perfil con dispositivo FishBAC, viables para una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, es forzoso realizar pruebas de laboratorio bajo las condiciones a las que se ven sometidas en particular las turbinas eólicas, así como aplicar la normativa que garantice un funcionamiento seguro y confiable durante su vida útil.

Discusión

La mayoría de las investigaciones de los dispositivos FishBAC se realizan para aplicaciones en aeronaves. En la última década se ha empezado a investigar estos dispositivos para otras aplicaciones como drones y turbinas eólicas. Sin embargo, hay una diferencia notable en el incremento de la relación sustentación / arrastre dependiendo de la aplicación: en aeronaves (hasta un 30%), drones (hasta un 25%) y turbinas eólicas (hasta un 20%), en comparación con un perfil aerodinámico sin dispositivo FishBAC. Lo anterior se debe a que las condiciones de operación y las cargas aerodinámicas son diferentes dependiendo de la aplicación. Es necesario tomar en cuenta estas condiciones específicas de funcionamiento, así como aplicar las normativas al realizar pruebas de laboratorio, de esta manera, se puede garantizar la seguridad y el funcionamiento confiable de los perfiles aerodinámicos con dispositivos FishBAC.

Conclusiones

El dispositivo FishBAC es un mecanismo que ofrece un aumento significativo en la relación sustentación / arrastre en una variedad de perfiles y condiciones de operación, lo cual se traduce en una mayor eficiencia aerodinámica con aplicación en aeronaves, drones y turbinas eólicas.

Los estudios numéricos y simulaciones computacionales de los perfiles aerodinámicos con dispositivo FishBAC han demostrado una buena concordancia entre los resultados teóricos y experimentales en términos de deformación estructural, distribución de presiones y relación sustentación/arrastre. El uso de dispositivos FishBAC para aplicaciones en turbinas eólicas aún se encuentra en etapas tempranas, por lo tanto, hay escasez de investigaciones en este tema.

Justificación

En la Conferencia de las Partes 28 (COP28), también conocida como Cumbre del clima 2023, 198 países firmaron el Acuerdo de Dubái, entre los cuales se encuentra México. Su principal objetivo es limitar el aumento del calentamiento global a 1.5°C mediante la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero en un 43% para 2030 y hasta un 60% para 2035 en relación con los niveles de 2019, y para 2050 alcanzar cero emisiones netas de dióxido de carbono [3]. Para lo anterior es necesario triplicar la capacidad de generación eléctrica de energías renovables, dentro de estas se encuentra incluida la energía eólica.

México cuenta con una Estrategia Nacional del Sector Eléctrico que busca acelerar la modificación de la matriz energética hacia las energías renovables y limpias [19]. En este contexto, es fundamental realizar estudios que permitan maximizar la eficiencia en la conversión de la energía eólica en energía eléctrica. Mejorar el diseño de los álabes de turbinas eólicas es un aspecto clave, dado que estos componentes desempeñan un papel determinante en el aprovechamiento del recurso eólico.

El álabes es uno de los principales componentes de una turbina eólica ya que se encarga de convertir la energía eólica en energía mecánica, para conseguirlo depende de la geometría del perfil aerodinámico. Sin embargo, la selección del perfil aerodinámico convencional es un compromiso de ingeniería para obtener una relación de sustentación aceptable para una determinada velocidad del viento [48].

No obstante, la velocidad del viento es un parámetro que varía. Por lo tanto, existe la necesidad de variar la forma del perfil aerodinámico para conseguir una mayor relación de sustentación para las diferentes velocidades del viento, lo cual se traduce en una mayor generación de energía eléctrica.

Aunque no es un concepto nuevo, ya que hay evidencia de conceptos de dispositivos de curvatura variable desde la década de 1920, ha habido un interés considerable en los dispositivos FishBAC en los últimos años para implementar este enfoque [6]. Principalmente en aplicaciones en aviones [20], helicópteros [21] y drones [7, 14, 15] pero también, aunque más recientemente, en turbinas eólicas [17]. Actualmente no existe ninguna turbina eólica de baja capacidad comercial que implemente el dispositivo FishBAC.

Una vez completado el diseño y construcción de un álabes de turbina eólica no hay garantía de que funcionará según lo previsto. Las únicas pruebas reales del diseño del álabes son pruebas rigurosas en un entorno de laboratorio y en una turbina eólica operativa [22].

Por lo tanto, es necesario realizar una evaluación del álabes con dispositivo FishBAC para garantizar un funcionamiento seguro y confiable durante su vida útil.

Hipótesis

Es posible realizar el diseño, simulación numérica y ensayos estructurales de álabes con dispositivo FishBAC de turbinas de viento de baja capacidad mediante software de elemento finito y técnicas de extensometría, empleando la norma IEC 61400-2 para obtener diseños seguros, confiables y de gran durabilidad estructural.

Objetivos

Objetivo general

Analizar estructuralmente los álabes de turbinas de viento de baja capacidad con dispositivo FishBAC empleando la norma IEC 61400-2.

Objetivos específicos

- 1.- Implementar el dispositivo FishBAC en el diseño del rotor de una turbina eólica de baja capacidad.
- 2.- Analizar mediante software de elemento finito el comportamiento del álabe con el dispositivo FishBAC, bajo las cargas estructurales marcadas por la norma IEC 61400-2.
- 3.- Manufacturar el álabe con dispositivo FishBAC para realizar ensayos estructurales de acuerdo con las cargas marcadas por la norma IEC 61400-2.

Metodología

La figura 0.1, muestra el diagrama de la metodología seguida en términos generales, la cual consta de 10 etapas. Esta metodología sigue un enfoque cíclico, lo que implica que al terminar cada etapa puede ser necesario regresar a la etapa anterior o incluso a varias etapas previas de acuerdo con los resultados obtenidos.

1.- Revisión de la literatura.

En esta etapa se realiza una revisión exhaustiva de la literatura cuya finalidad es conocer el estado del arte en la materia, lo cual permite seleccionar la información que servirá como base teórica en la investigación.

2.- Identificación y definición del problema.

En esta etapa se delimita el problema de la investigación, se determina la viabilidad de este de acuerdo con los recursos de los que se dispone, así como la relevancia del problema.

3.- Hipótesis.

Se plantea una hipótesis que servirá como punto de partida, esta debe ser clara y basarse en el análisis previo de la literatura. Su propósito es establecer una posible relación entre variables o predecir un comportamiento que será evaluado en la investigación mediante la experimentación y el análisis de datos.

4.- Diseño aerodinámico.

Consta de los siguientes pasos

- Selección de los parámetros de diseño: como velocidad del viento, tipo de aerogenerador, numero de álabes, potencia nominal, ubicación, etc.
- Selección de la teoría de diseño: en esta etapa se define el número de secciones y se elige el perfil aerodinámico.
- Resolución de ecuaciones
- Validación de diseño en QBlade: se emplea el software para validar el diseño aerodinámico obtenido de la teoría de diseño seleccionada.

5.-Diseño mecánico.

Consta de los siguientes pasos

- Selección de la metodología de diseño: se elige el enfoque más adecuado.
- Definición de los requisitos de diseño: se establecen las especificaciones técnicas y restricciones de diseño.
- Diseño conceptual: se generan alternativas de diseño considerando factores estructurales y funcionales.
- Diseño de detalle: se realizan planos y modelos detallados con dimensiones específicas, materiales y uniones.

6.- Simulación numérica.

- Cálculo de cargas de diseño: se determinan las fuerzas y momentos que actuarán sobre el aerogenerador de acuerdo con la norma IEC 61400-2.
- Modelado 3D: se puede representar como una superficie o como un sólido dependiendo de los materiales seleccionados para su manufactura.
- Selección del material y arreglo: se definen las propiedades de los materiales seleccionados, así como el arreglo, incluyendo el número de capas, orientación y espesor.
- Mallado: se discretiza el modelo seleccionando el tipo de malla que mejor se adapte a la geometría, así como el tipo y número de elementos o celdas y grado de refinamiento.
- Definición de las condiciones de frontera y carga: se definen las sujeciones y las fuerzas y momentos que actúan sobre el modelo 3D calculadas de acuerdo con la norma IEC 61400-2.
- Análisis de convergencia de malla: se verifica la precisión de los resultados en función de la calidad de malla.
- Resultados: se analizan los datos obtenidos para evaluar el comportamiento estructural del álabe.

7.- Manufactura.

- Selección del método de manufactura: considerando la geometría, los materiales seleccionados y los recursos disponibles se selecciona el método de manufactura. Entre los posibles métodos se incluyen diversas combinaciones de técnicas de manufactura, tales como la impresión 3D, los materiales preimpregnados y la infusión por vacío.
- Fabricación de moldes: se diseñan y manufacturan los moldes, asegurándose de que cumplan con las dimensiones y condiciones de trabajo requeridas en la manufactura.
- Manufactura.
- Inspección de calidad: se evalúa si el álabe cumple con las especificaciones de diseño (inspección visual, medición de dimensiones, etc.).

8.- Pruebas experimentales.

- Preparativos preliminares: se colocan las galgas extensométricas en las posiciones de interés.
- Selección de prueba y tipo de carga: esto de acuerdo con la norma IEC 61400-2.
- Montaje del álabe: se fija el álabe al banco de pruebas.
- Colocación de las cargas: se aplican las cargas de acuerdo con la norma IEC 61400-2.
- Medición de las deformaciones: cuando el número de mediciones es suficiente se retira el álabe, de lo contrario se retira la carga y se espera un periodo para que el álabe se restablezca a su posición original antes de repetir el paso anterior.

9.- Estadística de datos.

Se organizan los datos y se aplican métodos estadísticos adecuados, así como las pruebas de significancia, además se generan tablas y gráficos que permitan visualizar los resultados de deformación y esfuerzos obtenidos de forma experimental y mediante simulación numérica.

10.- Análisis de datos.

Se evalúan los resultados obtenidos y se elabora un reporte.

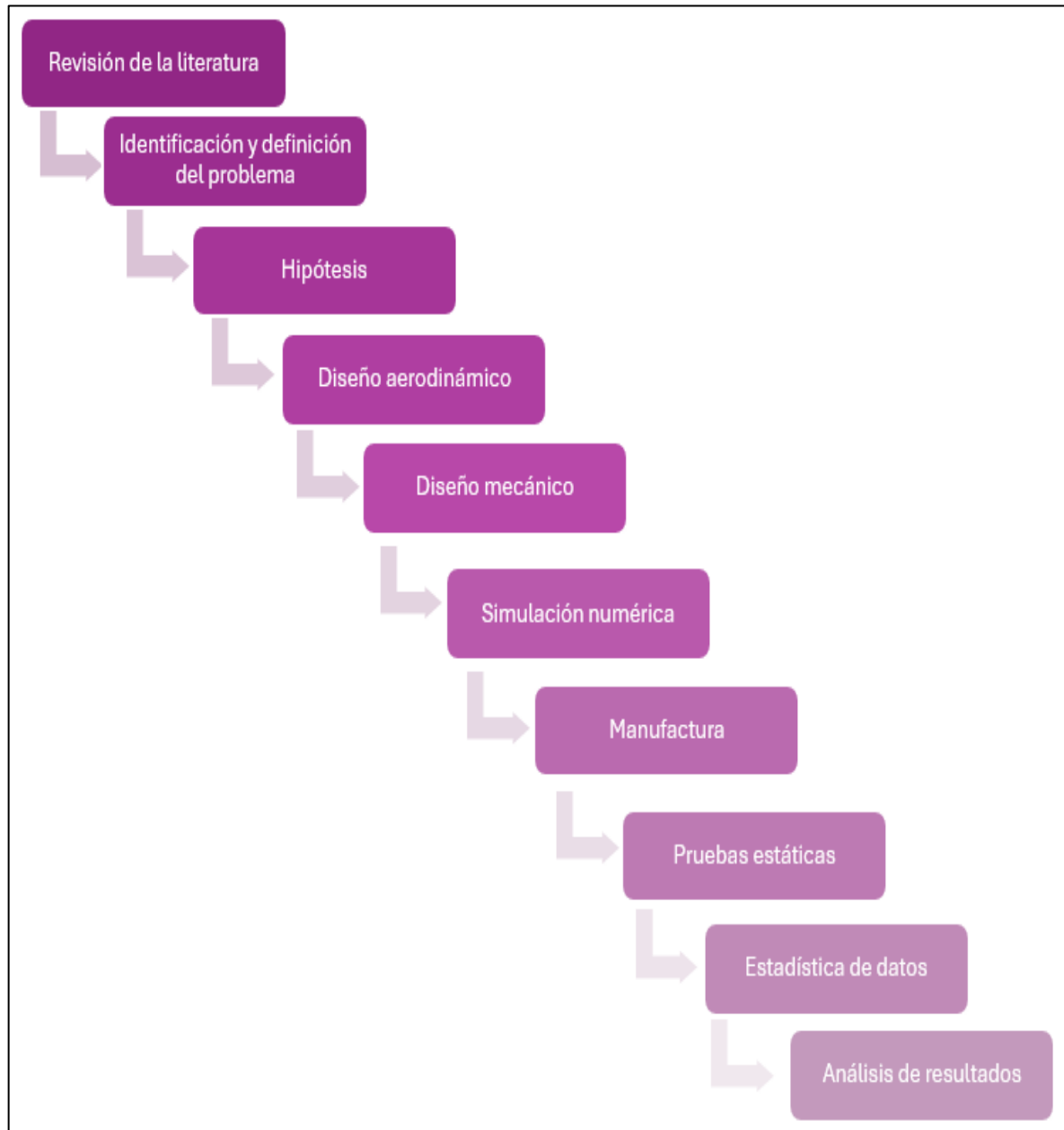


Figura 0.1. Metodología general.

Capítulo 1. Diseño aerodinámico del rotor de una turbina eólica

1.1. Modelo del elemento álabes (BEM)

Este trabajo se centrará en la teoría BEM. El modelo de elemento de álabes (BEM) es más riguroso en comparación con el modelo de disco de rotor. Este modelo se utiliza para derivar curvas de rendimiento teórico de turbinas eólicas. BEM, calcula la fuerza axial y el torque [34].

Asumiendo que las fuerzas sobre el álabes pueden calcularse mediante las características del perfil aerodinámico bidimensional, utilizando un ángulo de ataque (α) determinado a partir de la velocidad resultante incidente en el plano de la sección transversal (v_{res}), la componente de la velocidad en la dirección de la envergadura se ignora (z), así como los efectos tridimensionales [24].

Las componentes de la velocidad en una posición radial en el álabes expresadas en términos de la velocidad del viento, los factores de flujo (a y a') y la velocidad de rotación del rotor (ω_r) determinarán el ángulo de ataque (α). Al tener información sobre cómo varían los coeficientes característicos del perfil aerodinámico C_l y C_d con el ángulo de ataque se pueden determinar las fuerzas en los álabes para valores dados de a y b [24].

En la figura 1.1, el viento está en la dirección x , el eje de rotación es paralelo al eje xy el plano de rotación es el plano $y-z$. Las partes (b) y (c) son vistas del álabes cuando la orientación radial del álabes es paralela al eje z [24].

Considere una turbina con N álabes, donde v_{res} es el vector de velocidad resultante, α es el ángulo de ataque (ángulo entre el vector de velocidad resultante y la cuerda del perfil aerodinámico), β es el ángulo entre el vector de velocidad resultante y la dirección tangencial ($\gamma=90-\beta$), ϕ es el ángulo de inclinación (el ángulo entre la cuerda y la dirección tangencial), ω es la velocidad angular del rotor, r es la distancia radial desde el eje de rotación [24, 26].

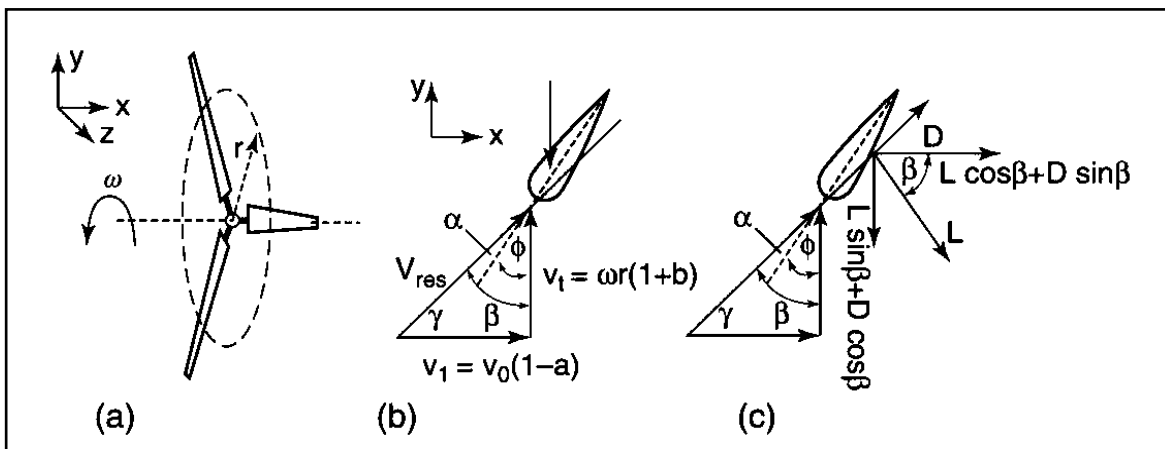


Figura 1.1 Velocidad del viento en relación con el álabes y las fuerzas de sustentación y arrastre [4].

Todo el análisis está a una distancia de $r < R$ (R es la longitud total del álabe). Considerando que la velocidad tangencial del viento en el álabe con respecto a un observador tiene una magnitud que es igual a la suma de la velocidad tangencial del álabe (ωr) y la velocidad tangencial de la estela ($\omega r b$). Además, tiene una dirección opuesta al movimiento del álabe. La velocidad tangencial de la estela se debe al momento tangencial impartido al viento por los álaves girando [34].

La velocidad resultante vista por el álabe es [34]:

$$v_{res} = \frac{v_0(1-a)}{\sin \beta} = \frac{\omega r(1+b)}{\cos \beta} \quad (1)$$

Las fuerzas de sustentación y arrastre en δr del álabe son [24, 26]:

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho v_{res}^2 C_L c N \delta r \quad (2)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho v_{res}^2 C_D c N \delta r \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores, $cN\delta r$ es el área efectiva en un anillo de espesor δr . La dirección de δL es perpendicular al vector de la v_{res} ; δD es paralelo a la v_{res} .

La fuerza a lo largo de la dirección axial es [24, 26]:

$$\delta L \cos \beta + \delta D \sin \beta = \frac{1}{2} \rho v_{res}^2 c N (C_L \cos \beta + C_D \sin \beta) \delta r \quad (4)$$

El par es la fuerza tangencial multiplicada por el radio [24, 26]:

$$\delta Q = \frac{1}{2} \rho v_{res}^2 c N (C_L \sin \beta - C_D \cos \beta) r \delta r \quad (5)$$

Se hacen las siguientes simplificaciones [24, 26]:

$$C_x = (C_L \cos \beta + C_D \sin \beta) \quad (6)$$

$$C_y = (C_L \sin \beta - C_D \cos \beta) \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_0} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{r}{R} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (10)$$

En la ecuación 5, se agrega la fuerza axial causada por la caída de presión debido a la rotación de la estela y la fuerza axial se convierte en (el valor de $\delta\dot{m}$ está en la ecuación 23) [34]:

$$\left[\frac{1-a}{\sin \beta} \right]^2 \sigma C_x = 4(a(1-a) + (b\mu\lambda)^2) \quad (11)$$

Si se ignora el término de caída de presión anterior que contiene b , entonces:

$$a = \frac{1}{\left[\frac{4 \sin^2 \beta}{\sigma C_x} + 1 \right]} \quad (12)$$

El torque es igual a la tasa de cambio del momento angular, por lo tanto:

$$\delta Q = \rho v_0 (1-a) 2\pi r \delta r (2\omega r b) r \quad (13)$$

Empleando las ecuaciones 7 y 10, de la ecuación anterior se obtiene que [34]:

$$b = \frac{1}{\left[\frac{4 \sin \beta \cos \beta}{\sigma C_y} - 1 \right]} \quad (14)$$

En las ecuaciones de a y b :

- β es una función de a y b
- σ es la solidez, una función de r
- C_x y C_y son funciones de β

Los valores de a y b se calculan iterativamente (empleando el algoritmo de Hansen). Habiendo calculado estos valores, se pueden derivar las expresiones para torque, potencia y coeficiente de potencia [34].

$$Q = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \pi R^3 \lambda \int_0^1 8b(1-a)\mu^3 \delta\mu \quad (15)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho v_0^3 \pi R^2 \lambda^3 \int_0^1 8b(1-a)\mu^3 \delta\mu \quad (16)$$

$$C_p = \lambda^2 \int_0^1 8b(1-a)\mu^3 \delta\mu \quad (17)$$

Para la mayoría de los diseños de álabes, el valor pico de C_p es de aproximadamente 0.5 y ocurre para valores de λ entre aproximadamente 8 y 10. Tenga en cuenta que λ determina β , que influye en los valores de a y b . Véase figura 1.2 [34].

Para valores pequeños de λ (alta velocidad del viento), el valor de β es grande y el valor de a es bajo, esto conduce a condiciones de pérdida. Para valores grandes de λ (baja velocidad del viento), el valor de β es bajo, lo que conduce a una alta resistencia. En resumen, para valores pequeños y grandes de λ , el valor de a no es óptimo y el valor de C_p es bajo [34].

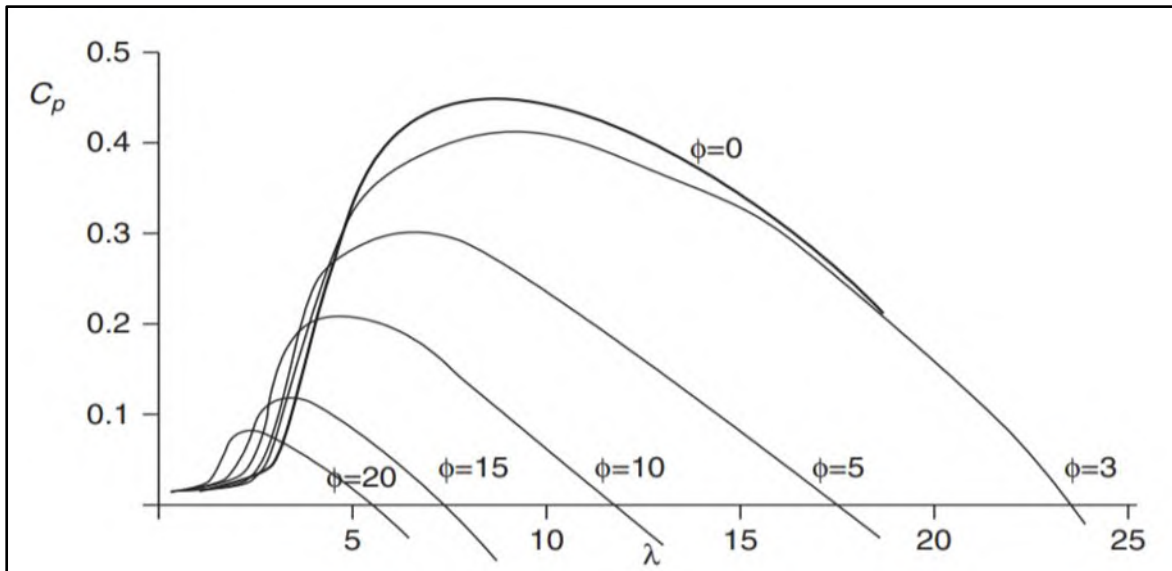


Figura 1.2. Coeficiente de potencia típico versus relación de velocidad de punta para diferentes valores ángulos de inclinación [24].

1.2.1 Diseño óptimo para operación de velocidad variable

El propósito de la mayoría de las turbinas eólicas es extraer tanta energía del viento como sea posible y cada componente de la turbina debe optimizarse para lograr

este objetivo. Optimizar un diseño de un álabe significa maximizar la potencia de salida [24].

Una turbina que funciona a velocidad variable puede mantener constante la relación de velocidad en la punta requerida para desarrollar el coeficiente de potencia máxima independientemente de la velocidad del viento [24].

Para determinar la geometría del álabe, es decir, cómo debe variar el tamaño de la cuerda a lo largo de este y qué distribución del ángulo β es necesaria, se aplican las ecuaciones de momento angular [24]:

$$\frac{Nc}{2\pi R} = \frac{4\lambda\mu^2 b}{\frac{v_{res}}{v_0} C_L} \quad (18)$$

Lo único desconocido en el lado derecho de la ecuación anterior es el valor del coeficiente C_L , por lo que es común incluirlo en el lado izquierdo de la ecuación. El coeficiente C_L se puede elegir el valor que corresponde a la relación máxima de sustentación / arrastre $C_L = C_D$, ya que esto minimizará las pérdidas de arrastre; a pesar de que se ha ignorado el arrastre en la determinación de los factores de inducción de flujo óptimos y la geometría del álabe, no se puede ignorar en el cálculo del torque y la potencia. La geometría del álabe también depende de λ [24].

1.2.2 Factor de pérdida de Prandtl

Diseño óptimo para operación de velocidad Prandtl es una relación empírica que corrige la suposición de la teoría BEM de que la fuerza del flujo actuando sobre los álabes es constante en cada uno de los elementos anulares.

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^f \quad (19)$$

$$f = -\frac{(N/2)(1-(r/R))}{(r/R) \sin \phi} \quad (20)$$

1.3 Metodología de diseño aerodinámico

El rotor de la turbina eólica es el componente principal de la máquina ya que es realmente el responsable de la extracción de energía del viento.; por lo cual los álabes del rotor de las turbinas eólicas se diseñan mediante análisis aerodinámico. En la literatura se encuentran varios métodos, sin embargo, no se sabe que un método o procedimiento sea el mejor que otro. Cada investigador suele adoptar el método de diseño que mejor conoce.

El diseño aerodinámico del rotor y álabes significa determinar los parámetros geométricos, fundamentalmente las distribuciones de cuerda y ángulo de torsión a lo largo del álabe partiendo de la potencia, longitud y relación punta- determinadas a priori dependiendo de las condiciones del viento en el sitio de montaje y

especificaciones requeridas. Para el presente trabajo se eligió la teoría BEM como metodología por su simpleza y porque ofrece resultados bastante precisos.

La metodología seguida consistió en una solución iterativa donde se asignan valores para α y α' . A partir de estos valores.

calcula el ángulo Φ para proceder a calcular el ángulo de ataque $\alpha = \Phi - \beta$ y los coeficientes de arrastre y sustentación. Este proceso se repite cíclicamente hasta que la diferencia entre α_{n-1} y α_n sea menor a 0.00005.

1.4 Diseño aerodinámico. Teoría BEM

El primer paso fue seleccionar el sitio de ubicación, se seleccionó la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ya que en ella se cuenta con una turbina eólica de modelo Skystream 3.7 con una potencia de 2400 W.

Se obtuvieron los datos de la temperatura del sitio de los últimos 5 años (2016-2020) para calcular la densidad del viento y viscosidad dinámica. Los datos se obtuvieron de la estación climatología Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, los cuales se encuentran disponibles para el público en general. La temperatura promedio obtenida en este período de tiempo fue de 19.05° C. Véase figura 1.3.

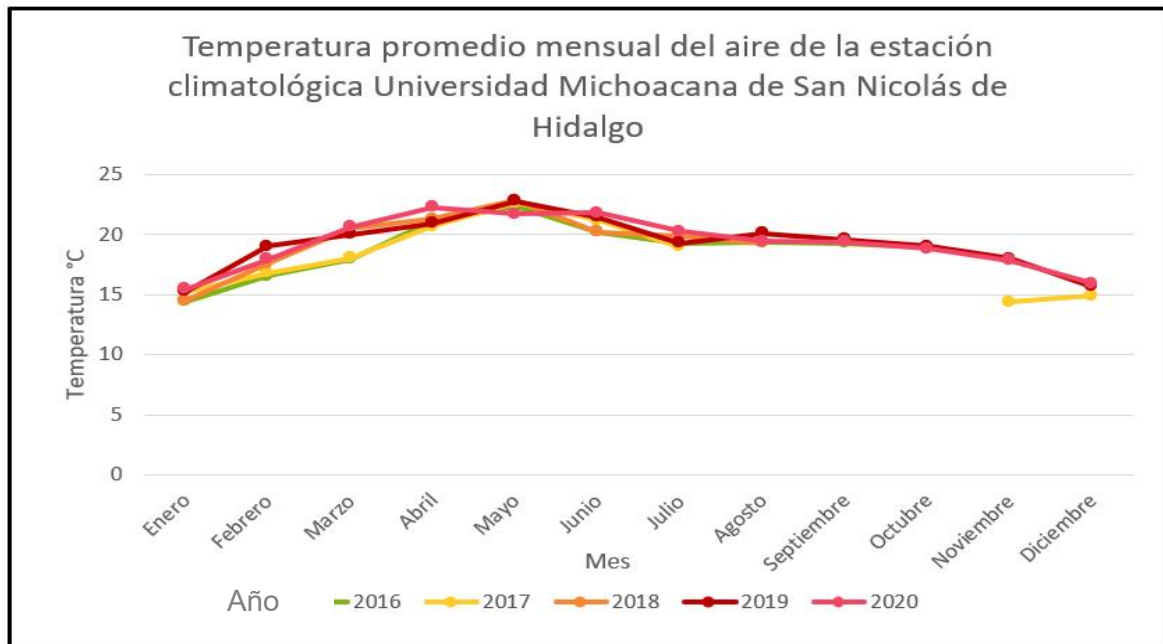


Figura 1.3. Temperatura promedio mensual del aire de la estación climatológica UMSNH

Se seleccionó una potencia de 2400 kW para una velocidad de viento de 12m/s; de acuerdo con las condiciones del sitio donde se ubicará la turbina se obtuvo una densidad del viento de 0.957 kg/m³ y una viscosidad dinámica de 1.71E-5 kg/m s. Se seleccionó un perfil NACA 4412 debido a que es el más estudiado en el tema de los dispositivos FishBAC.

El diseño obtenido tiene un diámetro de 2.5m y genera una potencia de 2.465W de acuerdo con la teoría BEM. En la tabla 2 se muestran los parámetros de diseño: número de secciones, cuerda, radio, ángulo de asiento o de torsión y la potencia esperada. Véase tabla 1.1.

Tabla 1.1. Diseño aerodinámico. Teoría BEM.



Parámetros de diseño aerodinámico			
Número de sección	Radio (m)	Cuerda (m)	Ángulo de asiento o ángulo de torsión β
1	0.374	0.108	13.9
2	0.499	0.085	9.9
3	0.624	0.070	7.2
4	0.749	0.059	5.2
5	0.874	0.051	3.6
6	0.998	0.045	2.2
7	1.123	0.040	1.0
8	1.248	0.035	0.0
Potencia esperada (W)			2465

1.5 Software Qblade

QBlade es un software de diseño y simulación del método Blade Element Momentum (BEM), Double Multiple Streamtube (DMS) y de Lifting Line Theory (LLT) para aerogeneradores de eje vertical y horizontal. También incluye herramientas para configurar y simular la estructura interna del álabe y realizar un análisis aeroelástico de un rotor de turbina eólica en condiciones de flujo turbulento [27].

Este software modela la estela con elementos de vórtice discretos (vórtices de línea o punto) que se desprenden en el borde de fuga durante cada paso de tiempo. Estos elementos de vórtice se mueven en una trayectoria prescrita o se convencion libremente con el flujo y las velocidades inducidas [28]

La ventaja de este tratamiento de estela, en comparación con el BEM, es que el cálculo de la inducción de la estela no se limita a un disco de rotor promediado anular, sino que se puede calcular con precisión en cualquier punto del dominio computacional durante cada paso de tiempo [28].

Se realizó la simulación en el software Qblade tomando los datos del diseño de la teoría BEM, en la figura 1.4 se muestran los datos introducidos al software y en la figura 1.5 el modelo 3D del álabe generado por el software.

	Pos (m)	Chord (m)	Twist	Foil	Polar
1	0	0.036	0	Circular Foil	CD = 1.2 360 Polar
2	0.25	0.036	0	Circular Foil	CD = 1.2 360 Polar
3	0.3744	0.1082	13.91	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
4	0.4992	0.0851	9.94	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
5	0.624	0.0696	7.22	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
6	0.7488	0.0587	5.195	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
7	0.8736	0.05	3.576	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
8	0.998	0.044	2.222	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
9	1.123	0.039	1.047	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
10	1.248	0.035	0	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
11	1.31	0.0175	0	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M
12	1.3728	0.0116	0	NACA 4412	T1_Re0.200_M0.00_N9.0 360 M

Figura 1.4. Datos de diseño en el software QBlade.

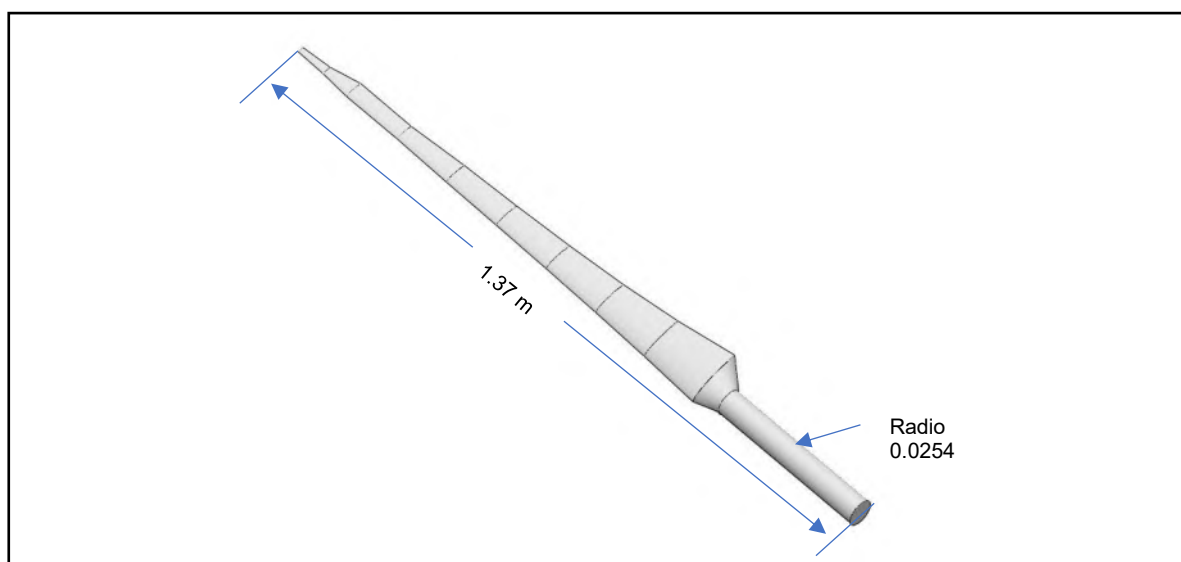


Figura 1.5. Modelo 3D del álabe en QBlade.

En la figura 1.6 se muestra la simulación obtenida del software QBlade para el rotor de una turbina eólica de baja capacidad y se aprecia que se a una velocidad de entrada promedio de 12 m/s se obtiene una potencia de 2.43 kW y un C_p de 0.435.

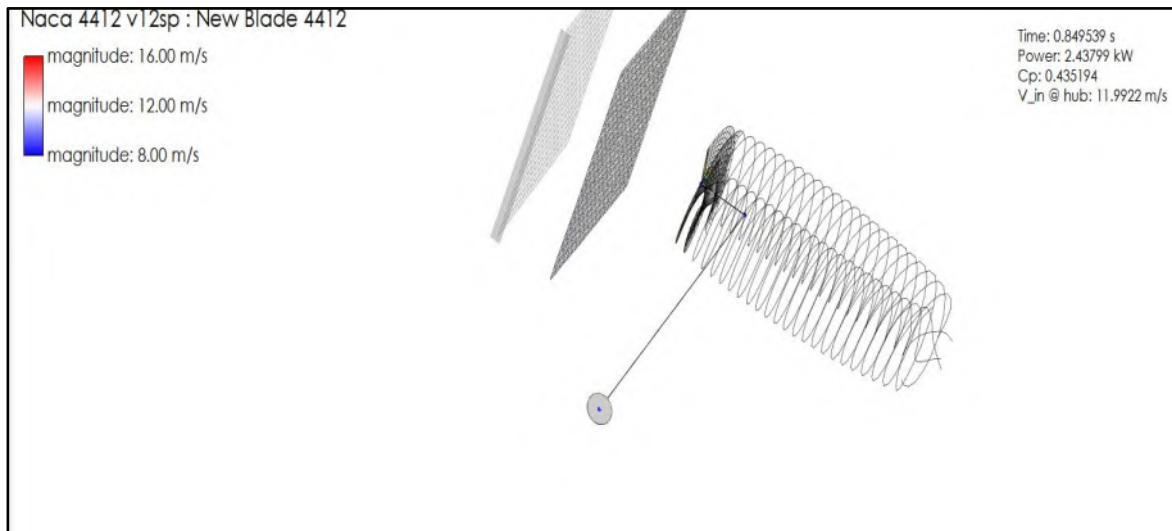


Figura 1.6. Simulación del rotor en QBlade.

1.6 Ángulo óptimo del dispositivo FishBAC

Empleando los softwares Qblade y XFOil se varió el ángulo del dispositivo FishBAC de 0° a 10° con incrementos de 1° (véase figura 1.7), evaluándolos en un rango de velocidades de 12 m/s a 16m/s.

En la tabla 1.2, se muestra la potencia generada para diferentes ángulos del dispositivo FishBAC y a diferentes velocidades. En verde se encuentra el valor de potencia generado para el álabe sin el dispositivo FishBAC, es decir con un ángulo de 0° . En azul se muestra el valor máximo de la potencia que es posible alcanzar para cada velocidad y en blanco los valores que son menores a la potencia para un ángulo de 0° . Finalmente se muestra como aumentaría el porcentaje de la potencia generada al modificar el ángulo del dispositivo FishBAC.

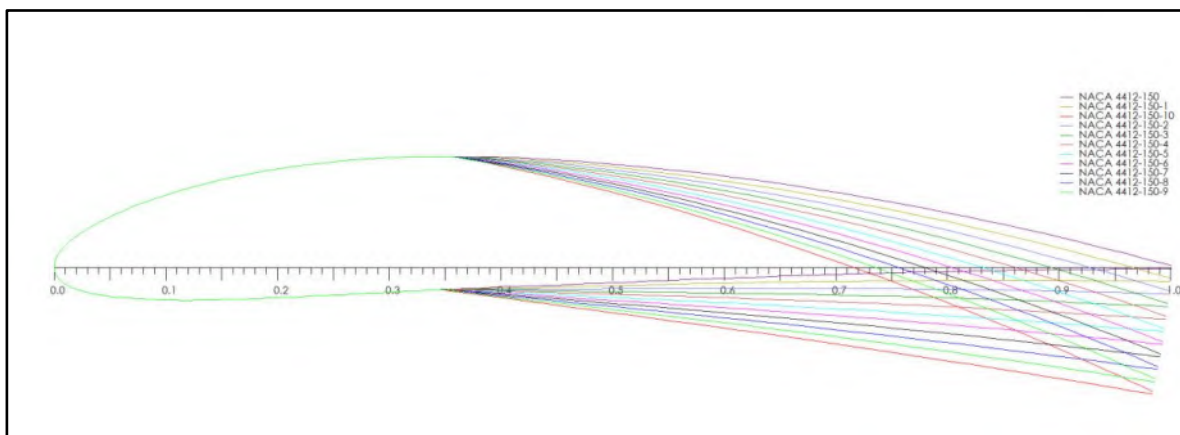


Figura 1.7. Perfil NACA 4412 con diferentes ángulos para el dispositivo FishBAC.

Tabla 1.2. Potencia generada para diferentes velocidades y ángulos del dispositivo FishBAC.

Angulo / Velocidad (m/s)	Potencia del álabe (KW)										
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
12	2.467	2.554	2.611	2.639	2.634	2.598	2.550	2.447	2.293	2.195	1.892
13	2.948	3.070	3.161	3.225	3.264	3.266	3.238	3.174	3.086	2.591	2.702
14	3.712	3.872	4.002	4.107	4.186	4.249	4.244	4.217	4.091	3.387	4.110
15	4.563	4.764	4.929	5.091	5.218	5.326	5.450	5.425	5.485	4.271	5.323
16	5.236	5.475	5.655	5.842	5.983	6.108	6.142	6.182	6.126	5.609	5.759
Porcentaje de potencia	100% ±1%	104% ±1%	103% ±1%	103% ±1%	102% ±1%	101% ±1%	100% ±1%	99% ±1%	98% ±2%	86% ±1%	110% ±2%

En la tabla 1.3, se muestra el coeficiente de potencia para diferentes ángulos del dispositivo FishBAC y a diferentes velocidades. En verde se encuentra el valor del coeficiente de potencia para el álabe sin el dispositivo FishBAC, es decir con un ángulo de 0°. En azul se muestra el valor máximo del coeficiente de potencia que es posible alcanzar para cada velocidad y en blanco los valores que son menores al coeficiente de potencia para un ángulo de 0°.

Tabla 1.3. Coeficiente de potencia para diferentes velocidades y ángulos del dispositivo FishBAC.

Angulo / Velocidad (m/s)	Coeficiente de potencia										
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
12	0.440	0.456	0.466	0.471	0.470	0.464	0.455	0.437	0.409	0.392	0.034
13	0.414	0.431	0.444	0.453	0.458	0.459	0.455	0.446	0.433	0.364	0.379
14	0.417	0.435	0.450	0.462	0.471	0.476	0.476	0.474	0.460	0.381	0.462
15	0.417	0.435	0.450	0.465	0.477	0.498	0.498	0.496	0.492	0.390	0.487
16	0.394	0.412	0.426	0.440	0.451	0.460	0.463	0.466	0.461	0.422	0.434

De acuerdo con las tablas anteriores se selecciona el mejor ángulo para cada velocidad, quedando como se muestra en la tabla 1.4, recordando que estos valores son teóricos.

Tabla 1.4. Ángulos del dispositivo FishBAC para cada velocidad del viento.

Velocidad (m/s)	Con FishBAC		Sin FishBAC
	Angulo	Potencia (kW)	Potencia (kW) a 0°
12	3°	2.639	2.46658
13	4°	3.264	2.94784
14	5°	4.249	3.7123

15	6°	5.450	4.56344
16	7°	6.182	5.23603
Porcentaje de potencia		115% ±1%	100% ±1%

En la figura 1.8 se muestra la potencia que tendrá la turbina eólica a diferentes velocidades con dispositivo FishBAC y sin dispositivo FishBAC (0°), se aprecia que en el rango de velocidades seleccionado de 12 a 16 m/s hay un aumento de potencia debido a la variación del ángulo de salida.

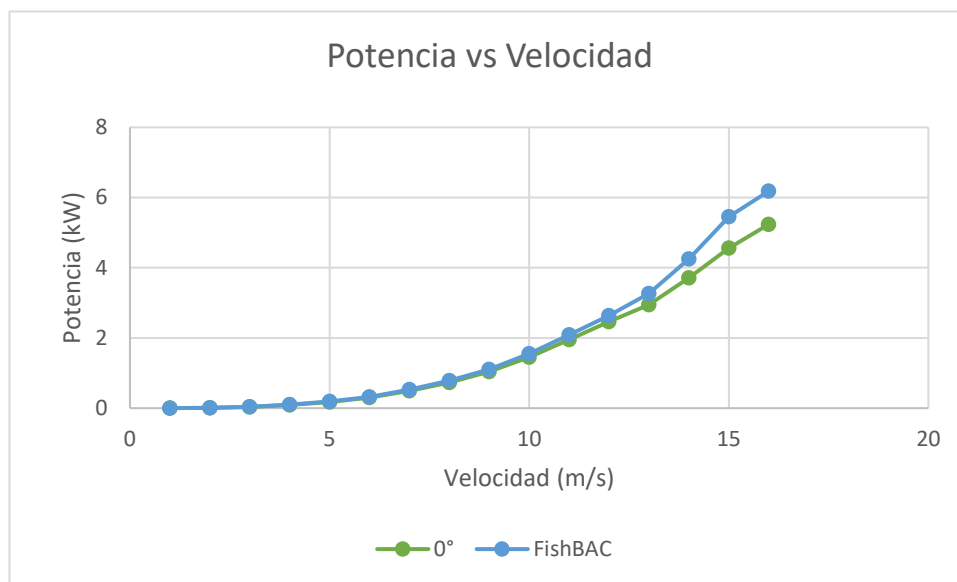


Figura 1.8. Potencia generada por la turbina eólica con y sin dispositivo FishBAC.

En base a los resultados anteriores, se cambió el perfil aerodinámico del álabe de un perfil NACA 4412 por un perfil NACA 4412 con un flap de 3° (véase figura 1.9). Este perfil se dividió en 7 partes, 3 partes para el extradós y 3 partes para el intradós y 1 borde que las une. Tanto en el intradós como en el extradós se encuentran 3 secciones, el borde de entrada, una sección media y el borde de salida. Véase figura 1.10. La sección del borde de entrada le corresponde el 35% de la cuerda, a la sección media el 50% de la cuerda y al borde de salida el 15% de la cuerda.

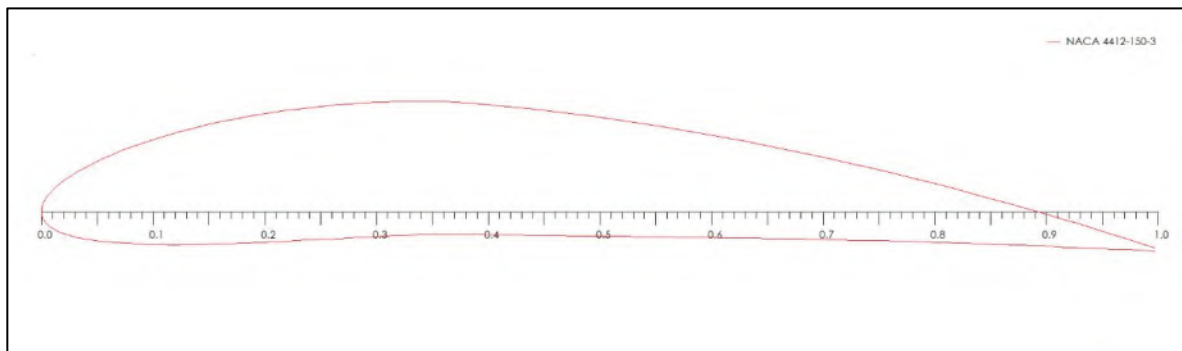


Figura 1.9. Perfil NACA 4412 con un flap de 3°.

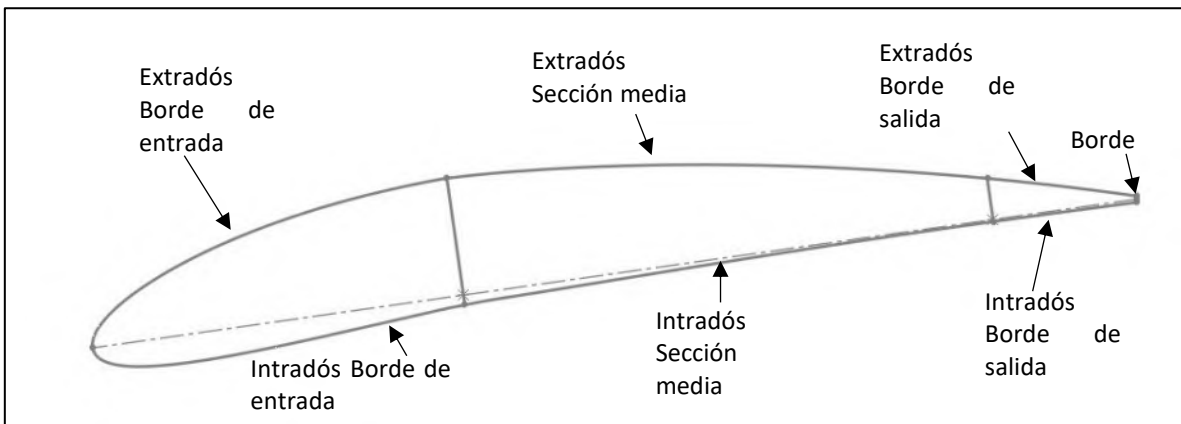


Figura 1.10. Partes para el modelado de las secciones del perfil aerodinámico.

Capítulo 2. Diseño mecánico del dispositivo FishBAC

2.1 Metodologías de diseño

Según Pahl y Beitz [29], las metodologías de diseño en ingeniería son una secuencia concreta de acciones para el diseño de sistemas técnicos que derivan su conocimiento de la ciencia del diseño, de la psicología cognitiva y de la experiencia práctica en diferentes campos. Según estos autores, una metodología de diseño, entre otras características, debe:

- Ser aplicable a todo tipo de actividad de diseño, no importa de qué especialidad se trate.
- Facilitar la búsqueda de soluciones óptimas.
- Ser compatible con los conceptos, métodos y resultados de otras disciplinas.
- No confiar en la casualidad en la búsqueda de soluciones.
- Facilitar la aplicación de soluciones conocidas a tareas relacionadas
- Ser sencilla.
- Reducir la carga de trabajo, ahorrar tiempo y evitar el error humano.
- Facilitar la planificación y la gestión del trabajo en equipo en un proceso de desarrollo de productos integrado e interdisciplinar.

De acuerdo con Cross [30], las metodologías de diseño se pueden dividir en dos grupos: metodologías descriptivas y metodologías prescriptivas.

Las metodologías descriptivas hacen énfasis en la importancia de generar una solución en una etapa temprana del proceso, esta solución inicial se somete después a análisis, evaluación, refinamiento y desarrollo. Tienen un enfoque heurístico, es decir, se basan en la experiencia previa. No dan una pauta sistemática y cerrada sino reglas generales y buenas prácticas que conducen a lo que puede ser la solución correcta. Dentro de este grupo se encuentran las metodologías de March [31], Mattchett [32], French [33], Roozenburg [34], etc. Véase figura 2.1 y 2.2.

Las metodologías prescriptivas recomiendan un patrón sistemático de actividades a realizar durante el proceso de diseño. Enfatizan en la necesidad de un trabajo más analítico que las anteriores para llegar a la generación de soluciones conceptuales, con la intención de asegurar una comprensión total del problema. Generan varios conceptos de diseño y se desarrollan las mejores soluciones haciendo una elección racional del mejor diseño. Dentro de este grupo se encuentran las metodologías de Pahl y Beitz [29], Ullman [35], Archer [36], Taguchi [37], etc. Véase figura 2.3.

En muchas ocasiones se aplica una metodología prescriptiva con un proceso de diseño muy flexible e iterativo, que permite volver atrás y revisar planteamientos previos de etapas anteriores.

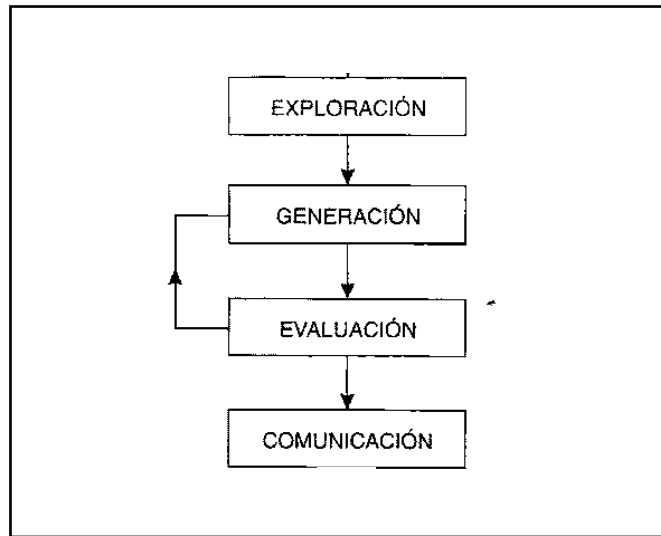


Figura 2.1. Metodología descriptiva de diseño sencilla [31].

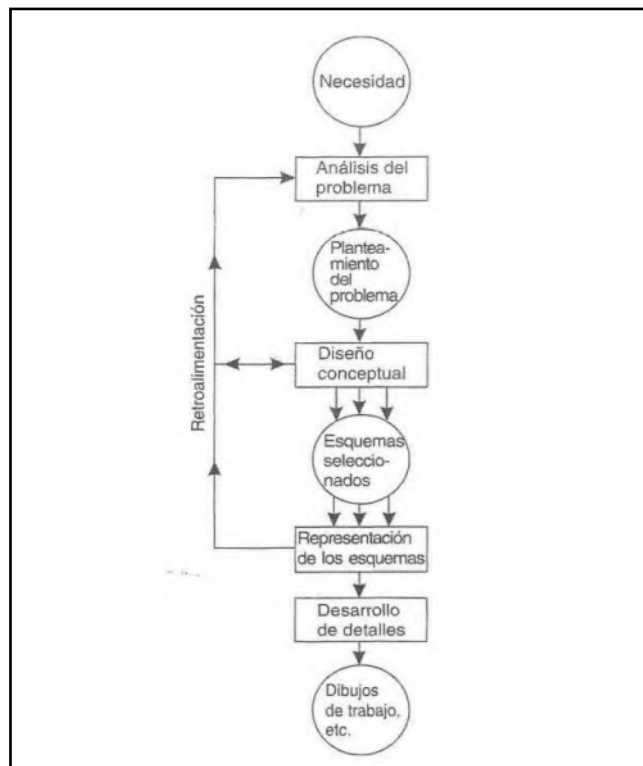


Figura 2.2. Modelo de Archer del proceso de diseño [31].

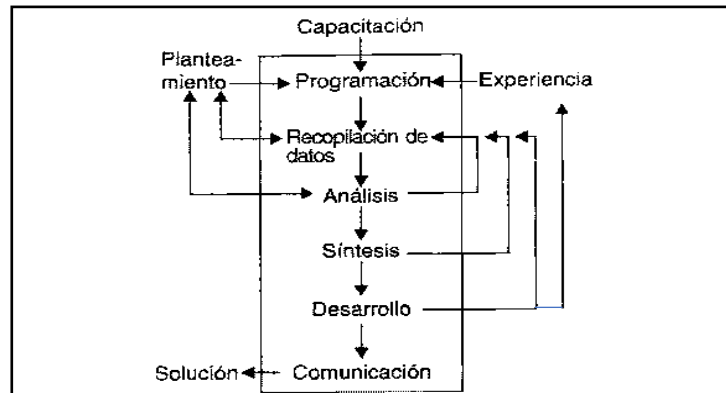


Figura 2.3. Modelo de French del proceso de diseño [31].

Para esta investigación se empleará una metodología prescriptiva y se seleccionó la metodología de Ullman debido a su sencillez, a que propone un modelo iterativo y a que hace énfasis en los costos, la calidad y el tiempo desde las primeras etapas del modelo con la finalidad de medir el éxito de un diseño mediante estos factores.

2.2 Metodología de Ullman

La metodología de Ullman consta de seis etapas secuenciales en cascada e iterativas (ver figura 2.4):

1.- Descubrimiento del producto: antes de que pueda comenzar el diseño original o rediseño de un producto, la necesidad de este debe estar establecida, las tres fuentes primarias para el diseño proyectos son: tecnología, mercado y cambio [35].

2.- Planificación del proyecto: la segunda fase es planificar, para que los recursos de la empresa de dinero, personas y equipo se puede asignar y contabilizar. La planificación necesita preceder a cualquier compromiso de recursos; sin embargo, como ocurre con gran parte de la actividad de diseño, esto requiere especular sobre lo desconocido [35].

3.-Definición del producto: el objetivo es comprender el problema y sentar las bases para el resto del proyecto de diseño, esto puede parecer una tarea simple, pero dado que la mayoría de los problemas de diseño son mal definido, encontrar la definición es una tarea importante [35]. Esta actividad sirve como base para generar los requisitos de los clientes, evaluar la competencia y generar especificaciones de ingeniería con la finalidad de generar objetivos medibles de desempeño para evaluar la calidad del producto.

4.- Diseño conceptual: se generan y evalúan conceptos para el producto tomando como base los requerimientos del cliente [35]. El primer paso de esta etapa es descomponer el problema en subproblemas y tratar de encontrar soluciones parciales a los subproblemas para finalmente recombinar las soluciones y formar una solución total.

5.- Desarrollo del producto: una vez que se han generado y evaluado los conceptos, es hora de refinar los mejores de ellos en productos reales. Al final de esta fase el producto se lanza a producción, por lo que las instrucciones de montaje y control de calidad deben estar completas y listas para la compra, fabricación y montaje de componentes [35].

6.- Soporte del producto: este es el proceso donde los cambios realizados en el producto, por cualquier motivo, se gestionan y documentan. A menudo existe una necesidad continua de soporte de fabricación y montaje, soporte para vendedores, y ayuda en la presentación del producto al cliente. Finalmente, los diseñadores deben estar involucrados en el retiro del producto, especialmente en productos para uso especializado a corto plazo [35].

Esta metodología del proceso diseño hace hincapié en los costos, la calidad y el tiempo en las primeras etapas del diseño ya que emplea muchas técnicas y herramientas que consumen gran cantidad de tiempo al principio del proceso pero que pueden eliminar cambios costosos más tarde. Los cambios que ocurren tarde en el proceso de diseño son más caros que los que ocurren al principio ya que el trabajo anterior se desecha.

Un buen diseño reduce los costos de producción en un 35% y en algunos casos puede llegar hasta un 75%. Los costos de producción se comprometen al final de la etapa de diseño conceptual hasta en un 75% y las decisiones tomadas después de esta etapa solo pueden afectar en un 25% [35]. Véase figura 2.5.

Un buen proceso de diseño apoyará la calidad del diseño en el producto, debido a que es menos costoso y mucho más efectivo incorporar calidad en el diseño de un producto. Esto implica no sólo diseñar un producto que funcione como debe, dure mucho tiempo, y cumpla con los deseos de los clientes, sino también diseñar los componentes y ensamblajes para que sean fáciles de fabricar y que el producto sea fácil e infalible de montar.

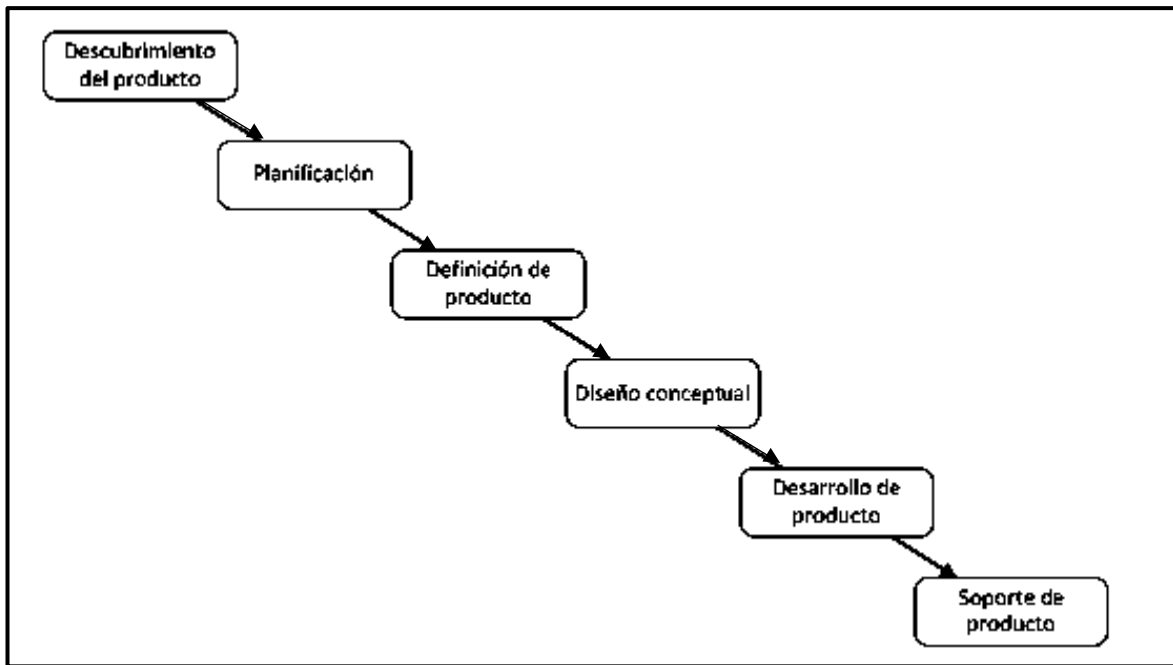


Figura 2.4. Metodología para el proceso de diseño de Ullman [36].

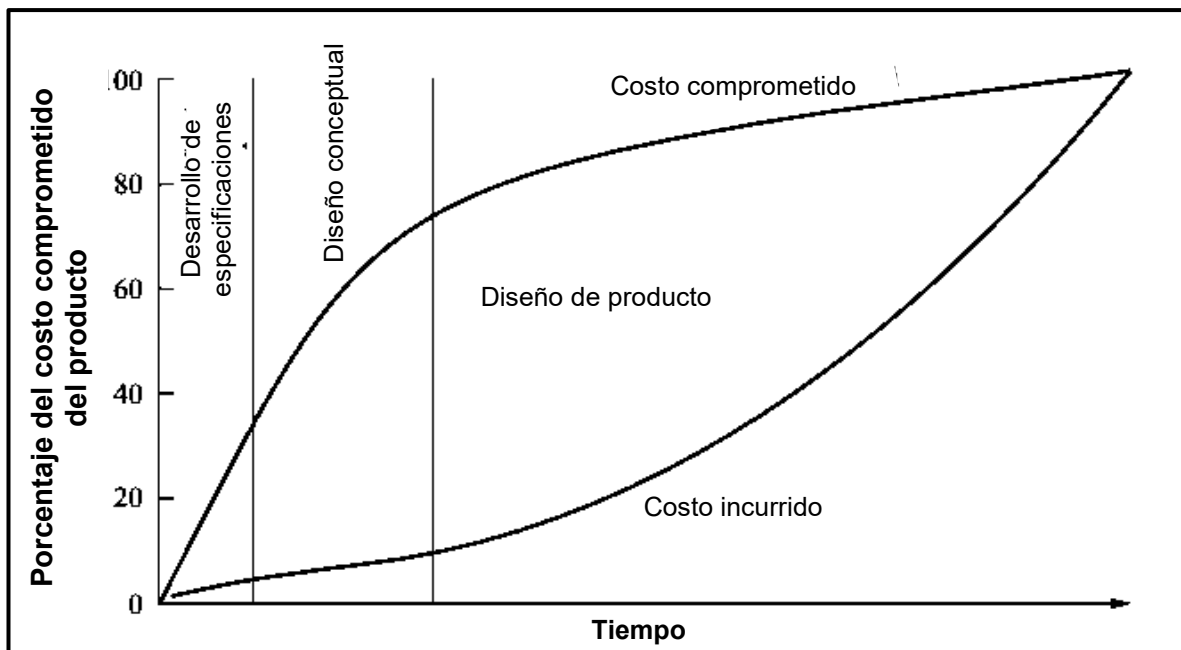


Figura 2.5. Costos de manufactura durante el proceso de diseño [36].

2.3 Etapa 1. Descubrimiento del producto

La fuente para este producto es el impulso tecnológico, ya que si bien no hay una investigada para aplicación en aerogeneradores. Por lo anterior puede elaborarse una propuesta de producto como se muestra en la figura 2.6.

Propuesta de producto
Nombre del producto propuesto: Dispositivo FishBac para álabes de turbinas de viento de baja capacidad
Resumen: El dispositivo FishBac permite realizar cambios de forma contralada y suave en la la curvatura del borde de salida en un perfil aerodinámico, con la finalidad de controlar la sustentación y el arrastre para así mejorar la eficiencia del perfil aerodinámico.
Antecedentes del producto: En los últimos años se han realizados investigaciones científicas de este dispositivo con aplicaciones en turbinas eólicas.
Mercado para el producto: Es necesario hacer estudios de mercado.
Competencia: No existe fabricante conocido de este dispositivo con aplicación en turbinas eólicas.
Detalles de la propuesta: Tarea 1: Desarrollar especificaciones de ingeniería para el dispositivo FishBac. Tarea 2: Desarrollar varios conceptos de diseño. Tarea 3: Desarrollar el producto. Tarea 5: Manufacturar y evaluar un prototipo.

Figura 2.6. Propuesta de producto para un dispositivo FishBAC con aplicación en turbina eólica.

2.4 Etapa 2. Planificación del proyecto

En esta etapa se identificaron 6 tareas principales como se muestra en la figura 2.7: definir el problema, generar especificaciones de ingeniería, desarrollar conceptos, evaluar conceptos, simulación de elemento finito y fabricación. Si los resultados de la simulación numérica no son satisfactorios se volverán a desarrollar conceptos.

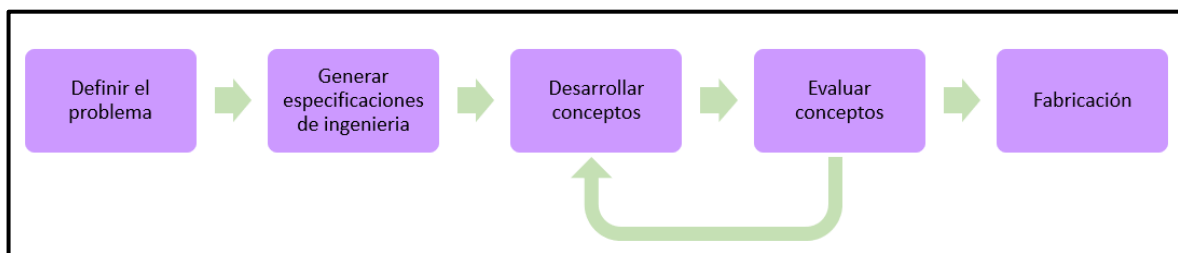


Figura 2.7. Panificación de las tareas para el diseño del dispositivo FishBAC.

2.5 Etapa 3. Definición del producto.

Hay muchas técnicas utilizadas para generar especificaciones de ingeniería. Una de los mejores y más populares actualmente se llama Quality Function Deployment (QDF), este método de diseño de productos y servicios recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operativas satisfactorias. Véase figura 2.8.

El QFD se originó en el Japón en la década de 1960 y su metodología se consolidó y expandió geográficamente en las décadas siguientes. En el origen del QFD está la denominada matriz de la calidad, que es en esencia una tabla que relaciona la voz del cliente con los requerimientos que la satisfacen [38] .

La matriz de la calidad suele desplegarse para dar lugar a otras matrices que permiten hacer operativa a la voz del cliente. Las aplicaciones recientes del QFD trascienden a las industrias manufactureras y de los servicios y comprenden la formulación de la estrategia empresarial y el análisis organizacional en los sectores público y privado [38].

El método QFD está organizado para desarrollar las principales piezas de información necesarias para comprender el problema:

- Escuchar la voz de los clientes.
- Desarrollar las especificaciones u objetivos del producto.
- Averiguar cómo las especificaciones miden los deseos de los clientes.
- Determinar qué tan bien la competencia cumple con los objetivos.
- Desarrollar objetivos numéricos para trabajar. [39]

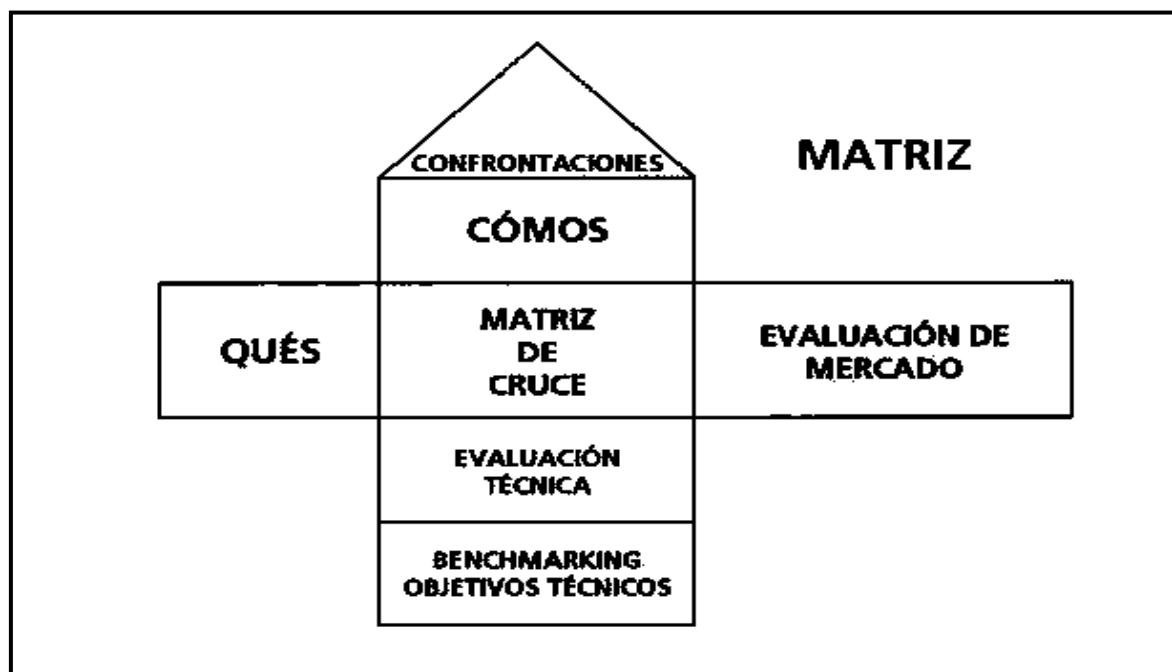


Figura 2.8. Matriz QFD [41] .

La matriz de la calidad contiene otros elementos importantes [38]:

- Una columna con la prioridad que los clientes asignan a cada QUES o Requerimientos del Cliente (RC).

- Una columna que compara, para cada QUES, a los productos de "nuestra empresa" con los de la competencia, según la evaluación del cliente.
- Una fila que pondera numéricamente la importancia de cada COMOS o Características Técnicas (CT) con respecto a las demás.
- Una evaluación técnica comparativa de las CT de "nuestro producto" con las CT de uno o varios productos de la competencia
- Un valor objetivo fijado para cada CT
- Un panel triangular que indica la correlación existente entre las distintas CT.

Aunque nació como una herramienta de diseño de nuevos productos, el QFD se convirtió en un elemento integrador de las distintas áreas de la firma, como marketing, ingeniería y operaciones, y de distintas actividades, como la gestión de la calidad [38].

Para proponer un formulario de encuesta de los RC se tomaron como base las siguientes investigaciones:

- Sarja y Halonen [40], llevaron a cabo un estudio con una investigación cualitativa por los expertos técnicos y a los responsables de la toma de decisiones de 10 compañías de turbinas eólicas ubicadas en Finlandia. Encontraron seis criterios principales: confiabilidad, volumen de producción, factores de costo, factores de disponibilidad, organización del mantenimiento, y otros.
- Akar et al. [41], realizaron una investigación donde implementaron la metodología QFD para mejorar la confiabilidad de los sistemas de energía eólica. Realizaron entrevistas electrónicas y telefónicas a ingenieros eléctricos, mecánicos, industriales y consumidores de sistemas de energía eólica. Encontrando 14 RC y 13 CT, donde los dos RC más importantes fueron uso seguro y voltaje y corriente regulares.
- Daim et al. realizaron combinaciones y permutaciones para evaluar los criterios más importantes en la selección de una turbina eólica marina que se ubicaría en el noroeste de Estados Unidos. Identificaron cuatro criterios, siendo la robustez el más importante, seguido del costo, la eficiencia y por último el impacto ambiental.
- Bocanegra [42], propone un diseño de una turbina eólica vertical para uso doméstico en zonas marginadas del estado de Campeche. Para los criterios de diseño acude a los habitantes de estas zonas para obtener las necesidades del cliente, los 3 RC principales fueron: satisfacer las cargas de la vivienda, bajo costo y facilidad de manufactura.
- Valverde et al. [43], evaluaron tres turbinas eólicas de eje vertical de bajas verticales. En su investigación implementaron una metodología QFD donde establecieron 12 RC y 12 TC, Siendo el RC más importante generar la mayor potencia.

En la tabla 2.1 se muestran los RC y los TC propuestos en cada una de las investigaciones anteriormente mencionadas.

Tabla 2.1. RC y TC propuestos en investigaciones QFD para aerogeneradores.

Saria y Halonen		Akar et al.		Daim et al.		Bocanegra		Valverde	
RC	TC	RC	TC	RC	TC	RC	TC	RC	TC
Confiabilidad		Durabilidad	Altura de la torre	Robustez		Satisfacer cargas de la vivienda rural		Poseer una estructura rígida	Peso de la estructura
Volumen de producción		Ahorro de energía	Cables	Costo		Bajo costo		Simple operación	Número de pasos para ensamblar el aerogenerador
Costos		Poco espacio requerido	Dimensiones de la turbina	Eficiencia		Facilidad de manufactura		Bajo costo	Costo
Disponibilidad		Alta eficiencia	Diseño de los álabes	Impacto ambiental		Resistencia		Tamaño reducido	Volumen
Organización del mantenimiento		Rentabilidad	Materiales de los alabes			Durabilidad		Debe trabajar de forma limpia	Generación de energía eléctrica
Otros: ruido, seguridad, cooperación entre la empresa, contratistas, autoridades y empresas de red eléctrica.		Fácil de usar	Rendimiento			Fiabilidad		El eje no debe flexionarse	Peso de los álabes
		utilizable en diferentes horas	Controlador de carga de viento			Herramientas estandar		Pocas piezas	Número de piezas
		Poco ruido	Generador eléctrico			Facilidad de reparación		Fácil mantenimiento	Tiempo de mantenimiento
		Uso simultaneo	Opciones de energía			Arranque a bajas velocidades		Generar energía eléctrica	Arranque a bajas velocidades
		Corriente regular	Voltaje de la batería			Refacciones genéricas		Tiempo de vida prolongado	Tiempo medio entre fallas
		Hermoso diseño	Inversor					Generar la mayor potencia	Flujo de aire
		Facil instalación	Tasa de flujo de aire y velocidad					Debe estar estandarizado	Número de normas
		Facilmente transportable	Sistema de protección contra altas velocidades						
		Uso seguro							

Para esta investigación se elaboró una matriz QFD de aerogeneradores horizontales de baja capacidad (ver figura 2.9). Para obtener los RC se realizaron encuestas vía correo electrónico dirigidas a profesionales expertos en cualquier área de la energía eólica, ya sea en el área de la manufactura, diseño, simulación, investigación, comercialización, mantenimiento, investigación, etc. En el anexo A se muestra el formulario de las encuestas realizadas.

Los TC fueron propuestos tomando como base la tabla 2.1 y con la experiencia en el área. En total se proponen 21 RC y 13 TC.

Para el estudio de mercado se hizo una investigación minuciosa de los distribuidores y fabricantes de aerogeneradores de baja capacidad en el país, utilizando diferentes vías de comunicación como páginas web, catálogos, correo electrónico y vía telefónica. Se encontraron 12 distribuidores, de los cuales solo 1 es distribuidor y fabricante nacional (Potencia Industrial Colibrí), estos fueron evaluados para cada RC tomando como criterios los marcados en la tabla 2.2. En total se evaluaron 78 productos que cumplen con las características de ser aerogeneradores horizontales de baja potencia.

De la matriz QFD se puede observar que los RC con mayor peso fueron dos: la eficiencia y la máxima potencia, seguidos por disponibilidad de repuestos, seguridad y sustentabilidad. Mientras que el RC con menor peso fueron estética, garantía y servicio rápido de mantenimiento. También se observa que la categoría con menor peso fue la de atención al cliente.

También se observa que la columna con un mayor peso relativo es el de costo, el segundo es resistencia al medio ambiente, el tercero es dimensión del rotor y en

cuarto lugar se encuentran potencia generada y número de normas que cumple. Las columnas con menor peso relativo son velocidad de arranque seguido por tiempo de mantenimiento.

En el techo de la matriz se aprecia que el precio es el TC que tiene la mayoría de las correlaciones negativas fuertes y que el peso también tiene algunas correlaciones negativas fuertes. Mientas que las correlaciones positivas fuertes se encenfran en la potencia generada y el voltaje de salida.

En cuanto al estudio de mercado no fue posible evaluar en cada uno de los RC para los distribuidores debido a la falta de información de sus productos, por lo que solo se evaluaron 12 de los RC. Los 9 RC que no se evaluaron fueron: seguridad, cumple con las normas de calidad, fácil instalación, esperanza de vida útil, disponibilidad de repuestos, mantenimiento sencillo, número de partes reducido, amigable con el medio ambiente y estética.

En la matriz QFD se aprecia que en términos generales los distribuidores de ubican de la media hacia arriba. Los RC de garantía y servicio de mantenimiento no se ofrecen al cliente por la mayoría de los distribuidores. La calidad de los materiales empleados en general es buena; mientras que uno de los RC de mayor peso relativo, la máxima potencia se encuentra polarizados entre malo y regular. En cuanto al precio, la mayoría tiene un precio bueno y para el tamaño reducido se encuentran dispersos, así como para el arranque a bajas velocidades. Los RC de atención al cliente en general se encuentran en bueno a excelente.

Tabla 2.2. Criterios de evaluación para los distribuidores y fabricantes de aerogeneradores.

Calificación	Requerimientos del Cliente										
	Bajo costo	Arranque a bajas velocidades	Máxima potencia generada	Calidad de los materiales de fabricación	Tiempo de entrega	Poco ruido	Tamaño	Servicio rápido de mantenimiento	Garantía	Buen servicio al cliente del vendedor	Ubicación del distribuidor
	\$/Watt	m/s	Cp	Material	Dias	dB	Diametro ideal a condiciones estandar con una densidad de 1.225Kg/m ³ , un Cp ideal de 0.593 y una eficiencia ideal de 0.9999	Cobertura	años	Tiempo de respuesta	Ubicación
5	0-15	<=1.5	>0.5 y <0.59	Fibra de carbon y aluminio Fibra de carbon y fibra de vidrio	<20	<40	+/-10%	En todo el pais y en menose una semana	5 años o mas	Responde en el mismo dia	Centro del país: Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Estado de México.
4	15-30	>1.5 y <2	>0.4 y <0.5	Fibra de vidrio y aluminio	>20 y <30	>40 y <45	+/-15%	En todo el pais y en un plazo mayor a una semana	3 años	Responde en máximo 3 días	Dentro del país
3	30-50	>2 y <2.5	>0.2 y <0.4	Fibra de nylon y aluminio	>30 y <60	>45 y <50	+/-20%	En el centro del pais y en un plazo menor de un mes	1 año	Responde en máximo una semana	En el extranjero
2	50-100	>2.5 y <3	>0 y <0.2	Plástico	>60 y <90	>50 y <55	+/-25%	En una zona en especifico del pais	6 meses	Responde en más de una semana	-
1	mayor a 100	>3	>0.6	Otros	>90	>55	+/->25%	No lo ofrece	No ofrece garantía	No responde	-

Para esta investigación es necesario realizar una segunda matriz QFD con el despliegue de los componentes del aerogenerador, ver figura 2.10. Solo se incluyeron los principales componentes y se tomó como referencia el Handbook [24], Pramod [26] y Gasch et al. [44].

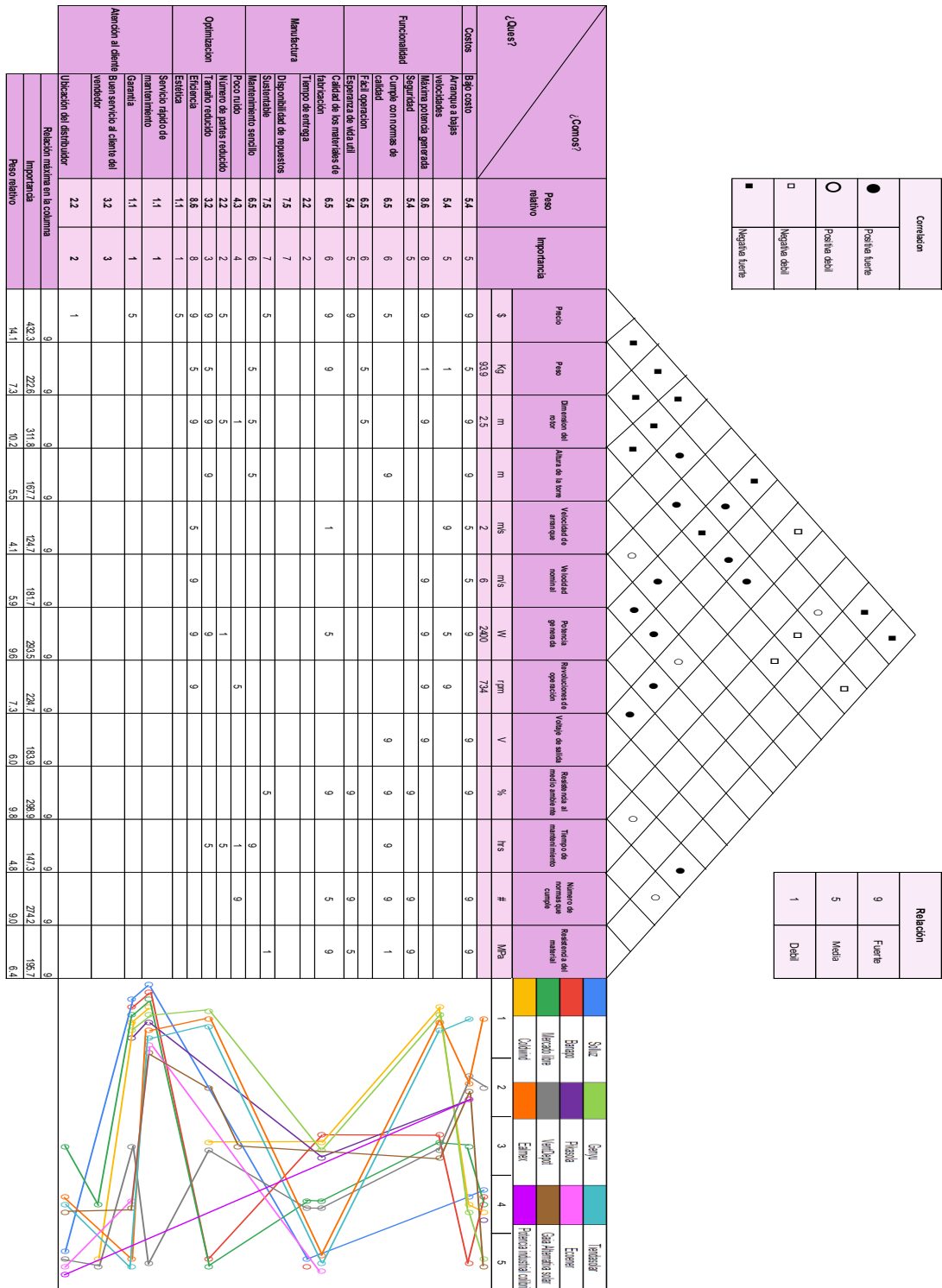


Figura 2.9. Matriz QFD, despliegue de los componentes de un aerogenerador.

¿Comos? ¿Ques?	Peso relativo	Importancia	Alabes	Gondola							Torre						
			Alabes	Buje	Mecanismo de lifting/lowering	Caja de cambios	Freno	Yaw drive	Pitch Bearings	Generador	Torre	Cimientos					
Precio	13.9	423.2	9		5	5	5		1	9	5	5	<table><tr><th>Relacion</th></tr><tr><td>9 Fuerte</td></tr><tr><td>5 Media</td></tr><tr><td>1 Debil</td></tr></table>	Relacion	9 Fuerte	5 Media	1 Debil
Relacion																	
9 Fuerte																	
5 Media																	
1 Debil																	
Peso	7.1	217.9	9			5			1	9	9						
Dimension del rotor	10.0	305.3	9														
Altura de la torre	5.4	164.2	9								9	9					
Velocidad de arranque	4.0	122.1	9		9	1											
Velocidad nominal	5.8	177.9	9		9	1											
Potencia generada	9.4	287.4	9	5	5			9		9							
Revoluciones de operación	7.2	220.0		1		9		9									
Voltaje de salida	5.9	180.0								9							
Resistencia al medio ambiente	10.2	311.6	9								9	9					
Tiempo de mantenimiento	4.7	144.2	1		5	9	9	9	9	5							
Número de normas que cumple	9.4	287.4	9							5							
Resistencia del material	6.9	210.5	9	9	5	9	9	5		9	9	9					
	Relación máxima en la columna		9	9	9	9	9	9		9	9	9					
	Importancia		744.2	109.2	263.0	369.1	174.0	226.7	63.5	459.7	336.0	271.7					
	Peso relativo		24.7	3.6	8.7	12.2	5.8	7.5	2.1	15.2	11.1	9.0					

Figura 2.10. Matriz QFD para aerogeneradores horizontales de baja capacidad.

En la matriz anterior se observa que los álabes son el componente con el mayor peso relativo llegando hasta casi una cuarta parte del total, el segundo componente con mayor peso relativo es el generador, seguido por la caja de cambios y la torre. Mientras que el buje y los pitchs bearings se encuentran en los últimos lugares.

También se aprecia que los álabes tienen una fuerte relación con la mayoría de los TC como precio, peso, dimensión del rotor, altura de la torre, velocidad de arranque, velocidad nominal, potencia generada, resistencia al medio ambiente, número de normas que cumple y resistencia del material. Se aprecia claramente la importancia de los álabes en un aerogenerador, de aquí la necesidad de realizar un diseño óptimo de este componente.

Es de destacar que en la encuesta se cuestionó acerca de su conocimiento de varios dispositivos de control de flujo en los álabes como los flaps, microtabs, Gurney flap, FishBAC y también sobre los álabes flexibles; los encuestados aseguraron reconocer en su mayoría todos los anteriores a excepción del Gurney flap. También se les cuestionó sobre cual tecnología consideraban más eficiente y un 40% respondió que el dispositivo FishBAC, frente a un 30% con álabes flexibles. Así mismo se les preguntó sobre cuál de los anteriores requería ser investigado más, y el 50 % de los encuestados respondió que los álabes flexibles mientras que el otro 50% seleccionó el dispositivo FishBAC.

Tomando en consideración los RC para un aerogenerador de baja capacidad y los TC para el componente álabes del aerogenerador se proponen los siguientes requisitos para un dispositivo FishBAC, véase tabla 2.3.

Tabla 2.3. Lista de objetivos.

Lista de objetivos
Bajo costo
Peso reducido
Resistente al medio ambiente
Mantenimiento sencillo
Materiales de buena calidad
Número de partes reducido
Tamaño reducido
Disponibilidad de repuestos
Cambios de posición pequeños
Manufactura sencilla

2.6 Etapa 4. Diseño conceptual.

Para analizar la estructura funcional del producto se emplea un diagrama de caja negra del dispositivo FishBAC donde se muestran los requerimientos necesarios de funcionamiento denominadas “entradas”, y las funcionalidades esperadas denominadas “salidas”. Ver figura 2.11.

Como entradas se tiene el dato de la velocidad del viento y energía sin limitarse a energía eléctrica pues podría ser también energía mecánica y como salidas se tiene ruido y energía cinética ya que es el cambio de posición lo que se desea lograr.

Como segundo paso en esta etapa se elaboró el árbol de funciones del dispositivo FishBAC, tal como se muestra en la figura 2.12. Se identificó la función general que es el cambio de la curvatura del borde de salida del perfil aerodinámico y dos subfunciones, que son posicionar correctamente el borde de salida del perfil y conservar la forma aerodinámica del perfil.

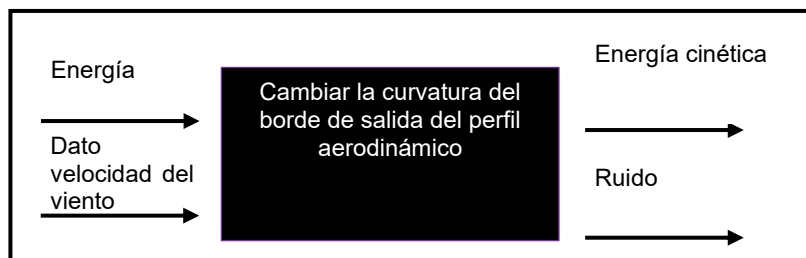


Figura 2.11. Diagrama de caja negra.

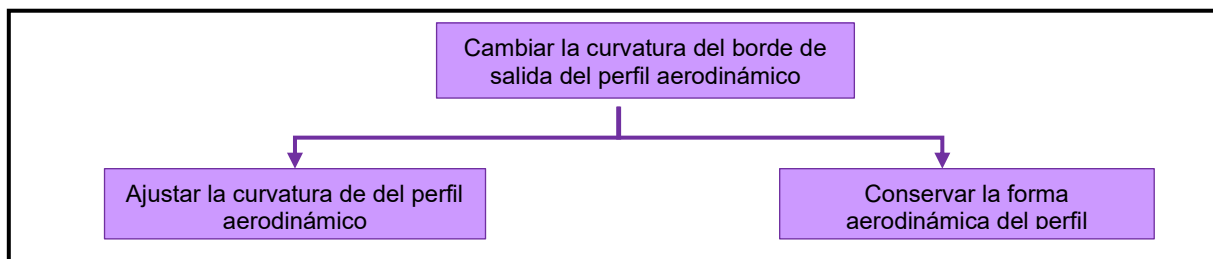
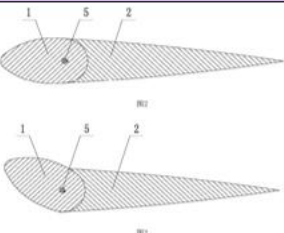
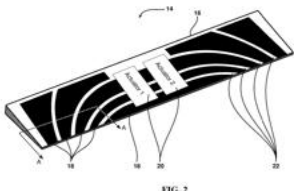
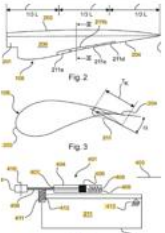
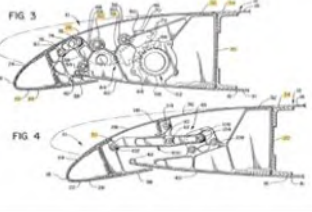
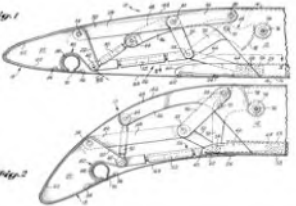


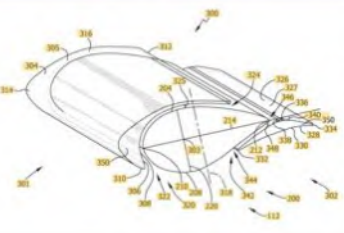
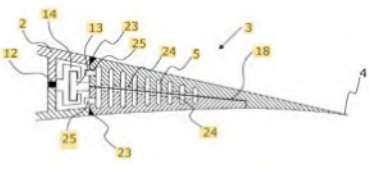
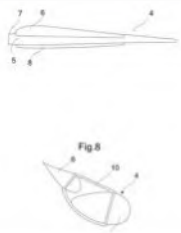
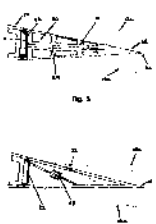
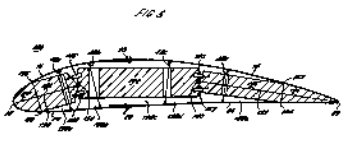
Figura 2.12. Árbol de funciones.

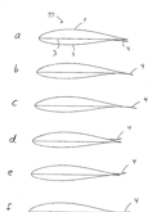
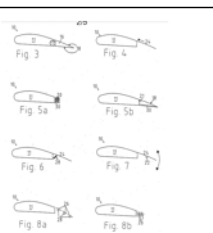
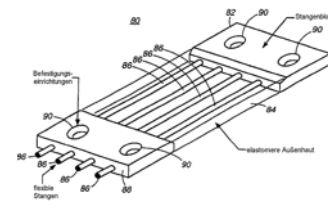
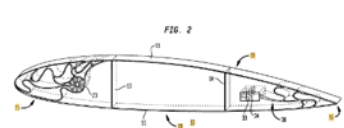
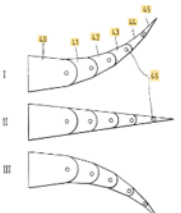
Como fuente de ideas se realizó una búsqueda tecnológica de patentes para dispositivos FishBAC con aplicación en turbinas eólicas y perfiles aerodinámicos y en la tabla 2.4 se muestran las patentes con un breve resumen de su funcionamiento.

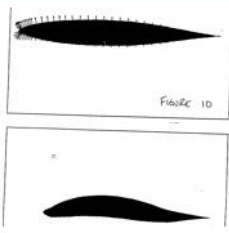
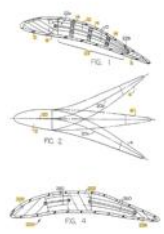
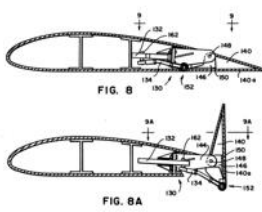
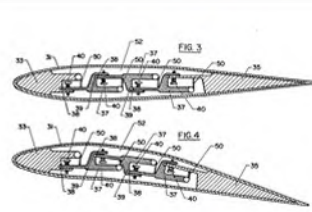
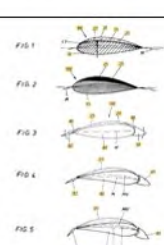
Tabla 2.4. Patentes de dispositivos FishBAC.

No. De patente	Autor principal	Año de publicación	Imagen	Resumen	Aplicación
CN109737004A	Li Guowen	2019		Por el diseño del álabe en dos partes, la primera parte es el álabe móvil y la segunda parte es el álabe del estator, en el álabe del estator la ranura de montaje del álabe móvil se procesa en la parte media de los segmentos del borde delantero, la ranura de montaje del álabe móvil se procesa colectivamente constituido completamente para desechar la paleta móvil por la paleta móvil y la cuchilla del estator, al tiempo que garantiza que la paleta móvil 1 se pueda girar en la ranura de montaje de la paleta móvil;	Turbina eólica
US11046415B1	Alejandro Pankonian	2019		La superficie de control y la parte fija del perfil aerodinámico están conectadas con una piel "continua" que se forma imprimiendo la piel al mismo tiempo que los componentes estructurales internos con una impresora 3d	Turbina eólica
DE1020181003 97A1	Alejandro Hoffman	2018		La compuerta delantera está dispuesta sustancialmente paralela al eje longitudinal de la pala del rotor, extendiéndose desde la raíz de la hoja hasta la punta de la pala. En el lado que mira hacia la raíz de la hoja está el cuerpo centrífugo firmemente con una varilla de perforación conectada por un extremo abierto del tubo guía que sobresale. En la punta de la cuchilla, el lado que mira hacia el cuerpo centrífugo está en el tubo guía a un resorte de compresión dispuesto en su lado en el cuerpo centrífugo y en su otro lado en un extremo cerrado del tubo guía está aplicado. La barra de perforación peina con un piñón, en el área del piñón está la aleta en un depósito sólido y en el lado opuesto de la aleta en un depósito flotante en la pala de rotor montada de forma giratoria.	Turbina eólica
US4706913A	James Byron Cole	1987		Para mover la sección de punta entre su posición de crucero superior y una posición de gran elevación desviada hacia abajo, se adjunta a la sección de morro una pista de leva generalmente arqueada, cuyas partes delantera y trasera se curvan hacia arriba. La pista de levas está obligada a moverse en una trayectoria generalmente arqueada, pero con un centro de rotación móvil, y es impulsada por un engranaje que se acopla con una porción trasera radialmente hacia fuera de la pista.	Perfil aerodinámico Aeronave
US4171787A	Edwin J. Zapel	1979		En la forma preferida, este accionador es una manivela acodada montada en el bastidor y operada a través de una conexión de engranajes desde un eje de potencia.	Perfil aerodinámico

No. De patente	Autor principal	Año de publicación	Imagen	Resumen	Aplicación
US2014035618 1A1	Luis A. Mailly	2013		La bisagra puede ser mecánica o puede ser simplemente un área dentro de la piel de la superficie aerodinámica configurada para flexionarse. Por ejemplo, la bisagra puede ser un laminado adelgazado tejido a ± 45 grados que forma la bisagra. El rigidizador solo de tracción puede disponerse a una distancia L de la bisagra medida paralelamente al eje elástico. Si la parte del borde de salida no puede desviarse en relación con el resto del perfil aerodinámico, el alargamiento del refuerzo solo resistente a la tracción en la parte del borde de salida	Turbina eólica
CN102661239B	Li Feng	2012		La invención describe una paleta colectora de múltiples alas capaz de utilizar la energía eólica de manera eficiente, que comprende al menos dos alas y al menos una zona formada entre las alas adyacentes. Al diseñar la forma de cada ala y la forma de la zona, las alas adyacentes pueden generar un efecto colector en el fluido que fluye a través de la zona entre las alas adyacentes, la zona es el espacio formado por la superficie cóncava trasera de la parte delantera adyacente, las alas y la superficie delantera convexa de las alas traseras adyacentes, y la superficie cóncava trasera y las alas delanteras adyacentes y la superficie delantera convexa de las alas traseras adyacentes están inclinadas hacia arriba y hacia adelante.	Turbina eólica
US2013011967 3A1	Klaus Hufnagel	2011		En este contexto, la presente invención sigue el enfoque de amortiguar las fluctuaciones de presión en una superficie aerodinámica resultantes de un cambio en el ángulo de ataque por medio de un ajuste pasivo de la inclinación de la superficie aerodinámica. El objetivo es mantener constante la sustentación, es decir, las cargas sobre el perfil aerodinámico. El cambio de comba se introduce por tanto por el propio flujo. El cambio de inclinación se facilita por lo tanto a través de un sistema de flaps montados de forma giratoria y/o elástica que comprende flaps de borde de ataque y de borde de salida. Ambas aletas están así cinemáticamente acopladas entre sí.	Turbina eólica
US2012014127 4A1	Megan M. Wilson	2011		La sección del borde de fuga se desvía hacia una posición neutra en la que la sección del borde de fuga gira en sentido de la cuerda hasta una posición de baja velocidad del viento en relación con la sección de aleta principal y se activa automáticamente desde la posición de baja velocidad del viento hasta una posición de mayor velocidad del viento en relación con la sección principal del perfil aerodinámico en función de la fuerza de empuje que actúa sobre la sección del borde de salida y la velocidad del viento sobre la sección del perfil aerodinámico.	Turbina eólica
US2012014127 2A1	Megan M. Wilson	2011		La porción de perfil aerodinámico incluye además una sección de perfil principal y una sección de borde posterior que está conectada de forma pivotante a la sección de perfil principal a lo largo de una línea de bisagra que se extiende a lo largo de la envergadura. Un elemento de torsión pasivo está acoplado entre la sección de lámina principal y la sección del borde de salida. El elemento de torsión se desvía hacia una posición neutra en la que la sección del borde de salida pivota en el sentido de la cuerda hasta una posición de baja velocidad del viento con respecto a la sección de lámina principal.	Turbina eólica
US8011887B2	Murray Pescad	2010		Se describe un conjunto de palas de rotor. El conjunto de palas de rotor incluye una pala de rotor principal, la pala de rotor principal incluye un lado de presión y un lado de succión que se extienden entre un borde de ataque y un borde de salida, y una pala de rotor auxiliar asociada con la pala de rotor principal, incluyendo la pala de rotor auxiliar un lado de presión y un lado de succión que se extiende entre un borde de ataque y un borde de salida. El conjunto de palas de rotor incluye además un miembro de soporte que conecta la pala de rotor auxiliar a la pala de rotor principal. La pala de rotor auxiliar está configurada para modificar una fuerza de sustentación asociada con el conjunto de palas de rotor.	Turbina eólica

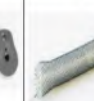
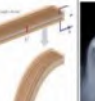
No. De patente	Autor principal	Año de publicación	Imagen	Resumen	Aplicación
US8303250B2	Ömer Mohame	2009		Comprende una primera pared lateral y una segunda pared lateral opuesta acopladas entre sí en un borde de ataque y en un borde de salida. El aparato generador de sustentación incluye al menos una extensión de pala delantera acoplada a la pala de rotor para definir un primer canal de flujo de aire entre la extensión de pala delantera y la pala de rotor. El aparato generador de sustentación también incluye al menos una extensión de pala trasera acoplada a la pala del rotor para definir un segundo canal de flujo de aire entre la extensión de pala trasera y la pala del rotor.	Turbina eólica
US8419363B2	Helge Aagaard Madsen	2007		Sección de borde de salida deformable de una pala de aerogenerador, estando formada al menos una parte de dicha sección en un material deformable. La sección de álabe comprende una o más cavidades que están conectadas o pueden conectarse a una fuente de fluido de una manera que permite que el fluido fluya desde la fuente de fluido a la cavidad o cavidades, de modo que la forma de la sección del borde de salida deformable y, por lo tanto, la inclinación de la sección transversal de la pala se puede cambiar por la presión del fluido en la cavidad o cavidades con cambios insignificantes del espesor y la longitud de la cuerda de la sección del borde de salida deformable.	Turbina eólica
BRPI0600613B1	Bento Massahiko Koike	2006		la presente invención consiste básicamente en una pala aplicada a rotores de aerogeneradores de giro horizontal con palas perpendiculares a dicho eje de giro, donde cada una de dichas palas está formada por varios elementos que forman perfiles aerodinámicos fijos entre sí, mediante elementos de fijación, y los elementos que forman perfiles se posicionan en la zona más próxima a la raíz de la pala.	Turbina eólica
DK1613860T3	Dan Christian Bak	2004		Comprendiendo cada perfil de soporte de forma deformable una parte sustancialmente indeformable y una o más partes deformables y medios actuadores para proporcionar las deformaciones en los perfiles del plano de apogo deformable, donde los medios actuadores son medios activos en cuanto que proporcionan deformación al suministrarles energía, donde la superficie exterior de al menos una de las partes deformables está definida por un revestimiento hecho de material flexible, por ejemplo, caucho, y donde la vaina está unida al miembro sustancialmente indeformable y donde el miembro actuador está ubicado dentro de la vaina, o donde al menos uno de los miembros de forma deformable está hecho de material(es) flexible(s), y la(s) viga(s) expandible(s) está(n) hecha(s) de una composición de material cuya extensión (s), acortamiento (s) y/o curvatura (s) son controlables mediante la aplicación de corriente eléctrica (s), como si estuvieran hechos de un material inteligente.	Turbina eólica
ES2354612T3	Sridhar Kota	2004		La primera superficie exterior está dispuesta en oposición sustancialmente distal a la segunda superficie exterior y en comunicación con la superficie flexible. De esta manera, la variación en el perfil de la superficie flexible es sensible a la variación en el perfil de la primera superficie exterior del bastidor flexible, además, se facilita un elemento de conexión que tiene una característica de resiliencia predeterminada. La disposición de conexión está acoplada resilientemente en un primer extremo de la misma a la primera superficie interior y en un segundo extremo de la misma a la segunda superficie interior. Un activador aplica una fuerza al segundo elemento de bastidor variable resilientemente con respecto a un elemento de soporte, lo que da lugar a una correspondiente variación en el perfil de la superficie flexible.	Perfil aerodinámico Aeronave
WO2003082671A1	Richard Linsley-Hood	2002		Se proporcionan dispositivos de soporte de carga que comparten la carga soportada por las superficies aerodinámicas y transmiten la carga a una estructura fija o larguero principal. Estos dispositivos de soporte y transferencia de carga también pueden comprender dispositivos de toma de carga variables, como bloques de goma, resortes o cualquier otro dispositivo conocido por sus propiedades elásticas. El movimiento relativo de las secciones adyacentes se controla mediante medios de actuación que están dispuestos entre las secciones adyacentes.	Perfil aerodinámico Aeronave Turbina eólica Helicóptero

No. De patente	Autor principal	Año de publicación	Imagen	Resumen	Aplicación
DK174318B1	Pedro Grabau	2002		El objeto se logra de acuerdo con la invención porque los medios consisten en al menos un laminado de al menos dos capas de materiales que tienen diferentes coeficientes de expansión por temperatura. De esta manera se logra que la pala del aerogenerador pueda cambiar de perfil y así aumentar o disminuir la máxima punta flotabilidad en función de la temperatura del aire, porque el cuerpo se curvará más o menos, dependiendo de la temperatura.	Turbina eólica
WO200205173 0A2	Aloys Wobben	2001		Parte de la superficie está formada por un material deformable que forma parte de un recipiente cerrado. Este recipiente cerrado puede llenarse con un medio gaseoso, por ejemplo, sometándose este medio gaseoso a una presión predeterminable. En una forma de realización especialmente preferida de la invención, la pala de rotor presenta una segunda estructura de soporte móvil en sí misma y/o en sí misma. En una forma de realización alternativa de la invención, una parte de la superficie de la pala del rotor consiste en tiras de láminas, cada una de las cuales está dispuesta sobre un carril de soporte que puede girar alrededor de su propio eje longitudinal. Durante el funcionamiento normal, estas laminillas están alineadas de tal manera que aumentan el área superficial aerodinámicamente efectiva de la pala del rotor. En este caso, el material deformable puede fijarse en puntos predeterminados sobre esta segunda estructura de soporte. Además, el material deformable se puede fijar por un lado a un núcleo de bobinado giratorio.	Turbina eólica
DE69916360T3	Cynthia Ann Gruensfelder	1999		El borde de ataque tiene un actuador giratorio para pivotar el borde de ataque. Un actuador lineal utilizado para desafilarse el borde de ataque, las líneas discontinuas muestran el borde de ataque en un estado extendido. El borde de ataque suele estar con el cuerpo conectado al ala del avión en un diagrama esquemático del borde de ataque. Como se analiza con más detalle a continuación, se utiliza una lámina elástica reforzada para realizar la forma arqueada suave y sin espacios del borde delantero en todo su rango de actuación.	Perfil aerodinámico Aeronave
US5971328A	Sridhar Kota	1999		De acuerdo con la invención, se proporciona un miembro de marco flexible que tiene un contorno predeterminado dispuesto para comunicarse con la superficie flexible. Un elemento actuador está dispuesto en una primera relación predeterminada con respecto al miembro del marco compatible, y se proporciona además al menos un miembro de conexión acoplado en un primer extremo del mismo al miembro del marco compatible, y en un segundo extremo del mismo al elemento actuador. Con esta disposición, el desplazamiento del elemento accionador da como resultado un desplazamiento correspondiente del contorno del miembro del marco compatible.	Perfil aerodinámico Aeronave
DE19741490C2	Matthias Piening	1999	No disponible	Perfil de entrada con un borde de perfil, con adaptación de perfil variable, con al menos tres elementos de nervio dispuestos en segmentos, articulados los segmentos y discurriendo los ejes de articulación paralelos al borde del perfil, con al menos un medio de accionamiento para mover elementos de nervadura adyacentes entre sí alrededor de los ejes de articulación, en el que los elementos de nervadura están conectados en forma de cadena cinemática para transmitir el movimiento, y caracterizado porque están previstos uno o más elementos de palanca, cada uno de los cuales conecta tres elementos de nervadura de forma articulada para entre sí, el elemento de palanca con cada uno de sus tres elementos de nervadura asociados está conectado a través de una junta giratoria o deslizante y los elementos de nervadura están rodeados por un revestimiento.	Turbina eólica
US6164599A	Matthias Piening	1997		El objetivo se logra mediante un perfil de perfil aerodinámico con adaptación de perfil variable, en el que se prevé una estructura de nervios del perfil de perfil aerodinámico que tiene zonas rígidas y zonas flexibles, en las que las zonas flexibles que incluyen elementos de nervio están dispuestas en segmentos y articulados entre sí en forma de cadena cinemática para transmitir movimiento, un panel de piel capaz de deslizarse sobre ésta y también al menos un medio de accionamiento para mover la estructura de nervios flexibles.	Perfil aerodinámico

No. De patente	Autor principal	Año de publicación	Imagen	Resumen	Aplicación
GB2308836A	Simón Fagg	1996		La invención utiliza una combinación de materiales y características que interactúan para proporcionar deformaciones específicas como resultado de las cargas de presión superficial. Al variar las combinaciones de materiales y las características geométricas,	Perfil aerodinámico Aeronave
US5367970A	Charles H. Beaucham	1993		Utiliza alambres de "aleación con memoria de forma" adaptados para contraerse y alargarse selectivamente como resultado de la aplicación o eliminación de calor.	Perfil aerodinámico
US5320491A	Clint Coleman	1992		Un conjunto de actuador descrito incluye una manivela acodada para convertir el movimiento de un varillaje de actuador 90° en un varillaje de alerones. Otro actuador tiene un tornillo de avance roscado con una tuerca acoplada al alerón. Al girar el tornillo, el alerón gira con respecto a la pala.	Turbina eólica
US5181678A	Sheila E. Widnal	1991		El ala es diseñado idealmente para montarse de manera pivotante en una estructura de soporte proporcionando ejes de pivote para las secciones del perfil aerodinámico cerca de sus bordes delantero y trasero, e incorporando medios para permitir que el perfil aerodinámico se deslice en una dirección a lo largo de su línea central no deformada. Se describe una sección de perfil aerodinámico elástica... muestra una realización adicional en la que la parte central del perfil aerodinámico flexible contiene una cavidad diseñada para adaptar la distribución de rigidez a una forma deseada, y que también incorpora la unidad de columna. La cavidad puede estar vacía o rellena con un material elástico diferente al del cuerpo del perfil aerodinámico y puede incorporar nervaduras. El perfil aerodinámico está montado en el eje de pivote y el eje de pivote que incorpora un medio deslizante en forma de borde de salida, ranura de la cavidad.	Perfil aerodinámico Aeronave
US5114104A	Manuel Cincotta	1990		Una superficie de control articulada para el control de vuelo utiliza una superficie de control moldeable que se forma contrayendo y alargando aleaciones con memoria de forma incrustadas dentro de la superficie de control. Las aleaciones con memoria de forma se contraen cuando se calientan mediante una corriente eléctrica aplicada y se alargan cuando se enfrían, es decir, se elimina la corriente eléctrica. La superficie de control resultante es capaz de generar una superficie de control curva sin ningún sistema de control electromecánico o hidráulico.	Perfil aerodinámico
EP0283730B1	Joachim Dipl.-Ing. Brix	1988		La invención tiene por objeto proporcionar un cuerpo de flujo genérico en el que la superficie de la membrana no solo forma un perfil que depende pasivamente de la cantidad de medio de presión x , sino que en el caso de un flujo de volumen activo del medio de presión el el perfilado de la membrana mientras se mantiene un predeterminado, en un estado no estirado, el perfil correspondiente al perfil de la superficie curvada del cuerpo de flujo tiene lugar en forma dosificada.	Perfil Aeronave

Con base en la revisión de patentes se generó una lluvia de ideas que se sintetizó en una tabla morfológica (ver tabla 2.5), la cual es una herramienta muy utilizada por los diseñadores para generar ideas de manera analítica y sistemática que da como resultado una matriz con funciones y componentes. Partiendo de los componentes individuales para cada función se hace un conjunto de combinaciones que cumplan con todos los requisitos.

Tabla 2.5. Tabla morfológica para un dispositivo FishBAC.

Tabla morfológica											
Función	Componentes										
	Poleas	Cadenas	Ruedas de fricción	Levas	Tejidos con memoria de forma	Electroimanes	Membranas con coeficiente de expansión térmica	Tornillo guía y manivela	Peso y resorte	Material deformable por corriente eléctrica	Fluido
Ajustar la curvatura											
	Rígido y flexible	Completa flexible	Fuelle	Membranas							
Conservar la forma del perfil aerodinámico (perfil)											

En la tabla 2.6 se muestran los 3 conceptos generados a partir de la tabla morfológica. El primer concepto se basa en un núcleo flexible que brinda la flexibilidad necesaria para el FishBAC, pero permite que se conserve la forma del perfil aerodinámico. El álabe se divide en dos zonas una rígida para brindar soporte estructural y una flexible para permitir el cambio de curvatura.

El segundo concepto consta de un mecanismo de poleas conectadas a unas bandas flexibles que se conectan a una estructura con forma de rejilla que permitirá el movimiento para ajustar la curvatura del perfil. La piel contará con un fuelle en la región que divide el FishBAC en el álabe.

El tercer concepto emplea electroimanes para permitir el ajuste de la curvatura del perfil y una piel dividida con membranas elásticas para permitir el movimiento sin perder la forma aerodinámica.

Tabla 2.6. Conceptos de componentes para un dispositivo FishBAC.

Conceptos			
Función	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Ajustar la curvatura	Núcleo flexible	Poleas	Electroimanes
			
Conservar la forma del perfil aerodinámico	Flexible y rígida	Fuelle	Membranas
			

En la figura 2.13, se muestra el modelado en SolidWorks del concepto 1. Como se ilustra en la figura consta de una zona rígida, mostrada en color gris y una zona flexible, que se muestra como transparente. En amarillo se muestra el núcleo flexible que permite el cambio de curvatura del álabe al actuar como elemento deformable dentro de la estructura.

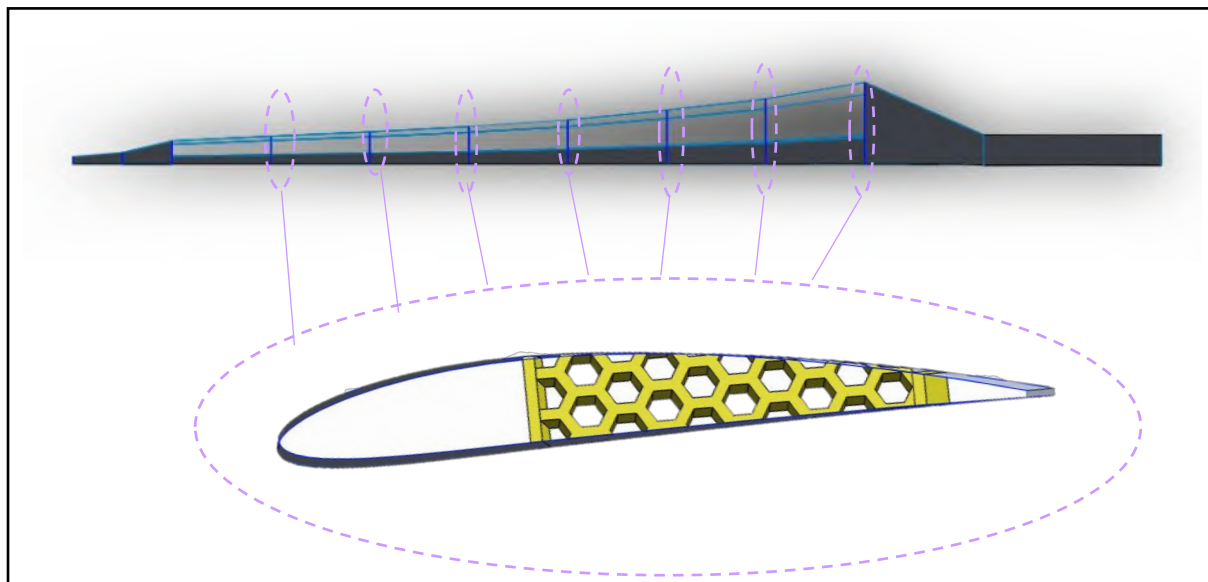


Figura 2.13. Modelado en SolidWorks del Concepto 1.

En la figura 2.14, se muestra el modelado en SolidWorks del concepto 2. Como se ilustra en la figura consta de una piel con una zona rígida (gris) y una flexible

(transparente). Ambas zonas se encuentran unidas por una sección en forma de fuelle mostrado en azul. Dentro de la zona flexible se encuentra el mecanismo que permitirá el cambio de curvatura del álabe, el cuál consta de una estructura con forma de rejilla de un material que brindará soporte y además permitirá el cambio de curvatura al ser jalado por una banda que se encuentra conectada a una polea y está a un eje.

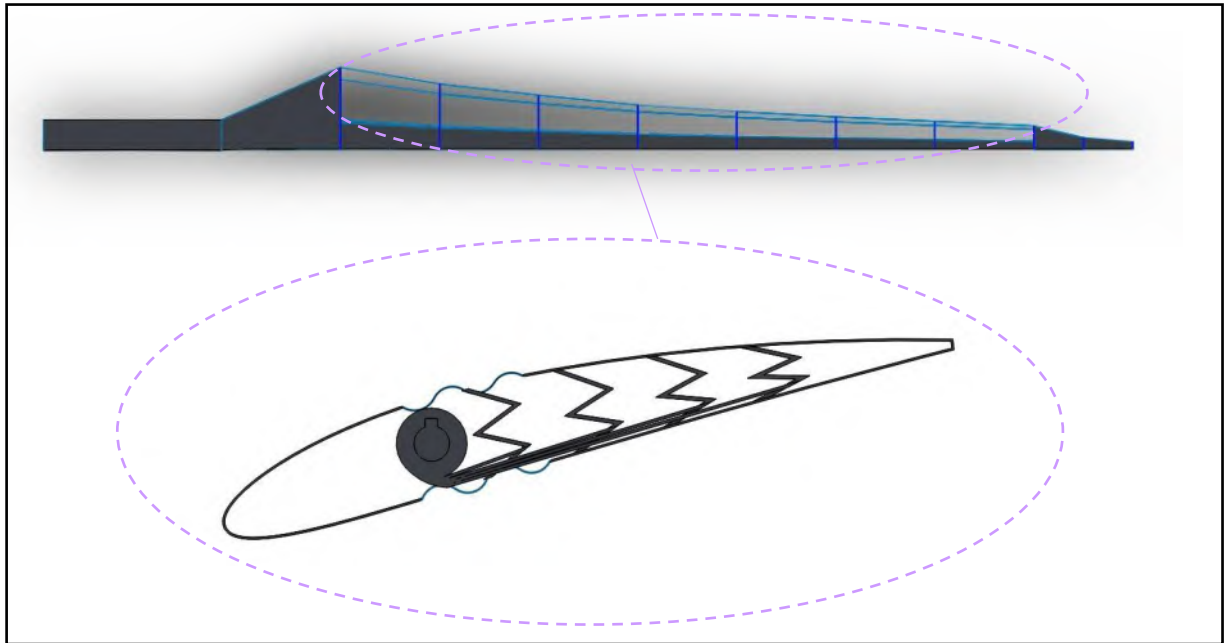


Figura 2.14. Modelado en SolidWorks del Concepto 2.

En la figura 2.15, se muestra el modelado en SolidWorks del concepto 3. Como se ilustra en la figura consta de una piel con dos zonas intercaladas, una zona rígida (gris) y una flexible (transparente). El mecanismo que permitirá el cambio de curvatura del álabe consta de un marco, el cual tiene dentro electroimanes que al ser activados permitirán que se modifique la forma del perfil.

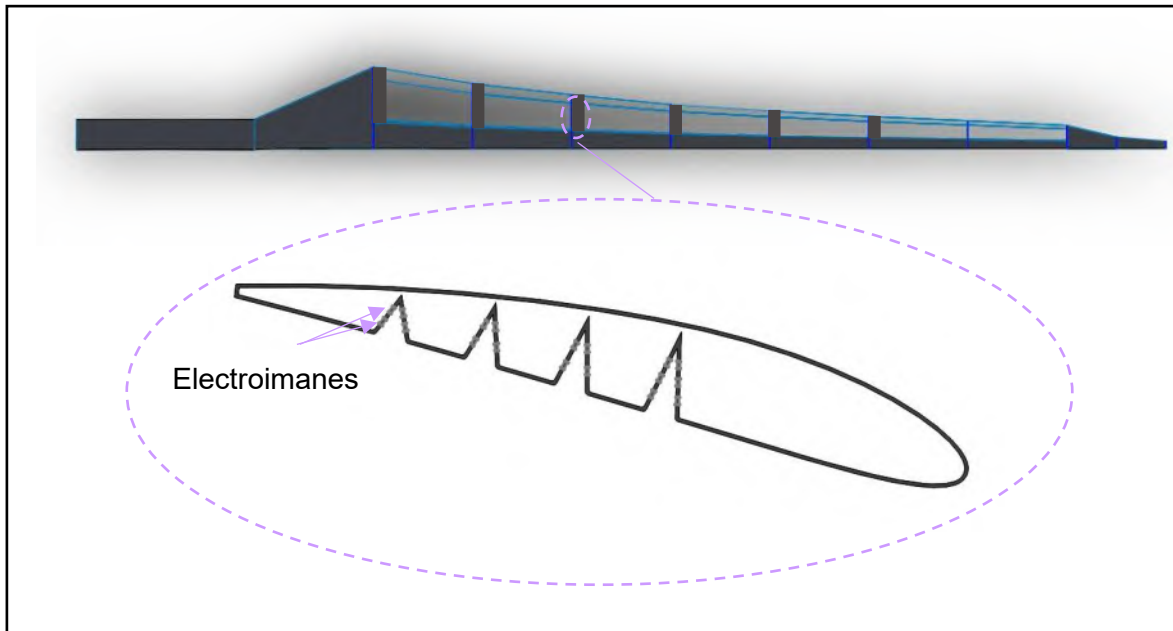
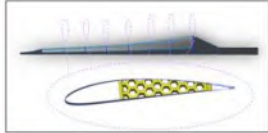
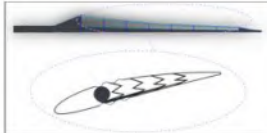
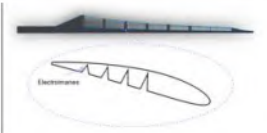


Figura 2.15. Modelado en SolidWorks del Concepto 3.

En la tabla 11 se muestra la evaluación de los conceptos propuestos de acuerdo con los objetivos de la tabla 7. La escala de evaluación se determinó con el menor puntaje, siendo el concepto 1 el que se adapta mejor a los objetivos, quedando en segundo lugar el concepto 2 y como última opción el concepto 3.

Tabla 2.7. Evaluación de los conceptos para un dispositivo FishBAC.

Objetivos			
	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Bajo costo	5	10	10
Peso reducido	5	10	5
Resistente al medio ambiente	10	10	10
Mantenimiento sencillo	5	10	10
Materiales de buena calidad	5	10	5
Número de partes reducido	5	10	15
Tamaño reducido	5	5	5
Disponibilidad de repuestos	15	15	15
Cambios de posición pequeños	5	5	10
Manufactura sencilla	10	10	15
Total	70	95	100

2.7 Cálculo de cargas para el mecanismo FishBAC

Es necesario un modelo para calcular el momento de transformación en una sección de pala. Ignorando la fricción, el momento de transformación total en una sección de pala con un flap adaptativo se puede determinar mediante la suma del momento de articulación debido a las cargas de gravedad, el momento debido a las cargas inerciales del flap y el momento debido a las cargas aerodinámicas [45].

- Cargas aerodinámicas

La siguiente ecuación nos da el trabajo realizado por las cargas aerodinámicas:

$$W_f = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M_f d\theta \quad (21)$$

Donde θ es el ángulo de variación del flap y M_f es el momento de la articulación del flap y este dado por la siguiente ecuación. Por lo que el trabajo realizado por las cargas aerodinámicas depende de θ y α .

$$M_f = q \left[\int_0^c C_{pu}(x) - C_{pl}(x) \right] \varphi(x) dx \quad (22)$$

Donde q es la presión dinámica, C_{pu} es el coeficiente de presión superior (upp) y C_{pl} es el coeficiente de presión inferior, $\varphi(x)$ es una ecuación que define el modo de deformación.

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0 & \text{cuando } 0 \leq x < c - b \\ c - x - b & \text{cuando } c - b \leq x < c \end{cases}$$

- Fuerzas centrífugas

La siguiente ecuación nos da el trabajo realizado por las fuerzas centrífugas:

$$W_i = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M_i d\theta \quad (23)$$

Donde M_i es el momento centrífugo modal y este dado por la siguiente ecuación.:

$$M_i = 2m_f(\theta - \gamma) \int_{c-b}^c \left(x - \frac{c}{4}\right)(x - c) \varphi(x) dx \quad (21)$$

Donde m_f es la masa de la sección con el FishBAC, γ es el ángulo de inclinación, c es la cuerda y x es una coordenada a lo largo de la cuerda.

- Energía de deformación

La energía de deformación del flap está dada por:

$$W_s = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M_s d\theta \quad (25)$$

Donde M_s es el momento de flexión modal y este dado por la siguiente ecuación:

$$M_s = k_s(\theta - \theta_0) \quad (26)$$

Donde k_s es la rigidez a la flexión.

Por lo que, la energía necesaria por el actuador es:

$$W_a = W_f + W_i + W_s \quad (27)$$

En la siguiente tabla se tienen los valores calculados para un ángulo de $\theta = 7^\circ$ de acuerdo con las ecuaciones anteriores.

Tabla 2.8. Trabajo por unidad de longitud.

Trabajo por unidad de longitud	J/m
W_f	0.0374
W_i	0.0002
W_s	0.0176
W_a	0.0552

La sección del FishBAC mide 0.625 m por lo que se necesita un trabajo de 0.0345 J. Considerando un factor de seguridad de 1.2 tenemos 0.0414 J.

2.8 Selección de componentes

Para la selección de los componentes se consideraron criterios como dimensiones reducidas, bajo peso, bajo consumo energético, y compatibilidad con el diseño mecánico del mecanismo FishBAC. A continuación, se describen los principales elementos seleccionados:

- Motor paso a paso: Se determinó un requerimiento energético de 0.414 J para operar el mecanismo en un rango angular de 3° a 7° . De acuerdo con la ecuación:

$$\tau = E / \theta \quad (28)$$

Donde τ es el torque en N m y E es la energía necesaria para hacer girar el eje en J, y θ es el ángulo en radianes. Para un ángulo de 7° (0.122 rad) se calculó un torque de 0.33 N m.

Con base en este valor, se seleccionó un motor paso a paso Nema 17 , con un torque nominal de 0.59 Nm, considerando además su bajo consumo energético y facilidad de control.

- Rodamientos: Se utilizaron rodamientos de bolas modelo 685ZZ, los cuales tienen un diámetro interno de 5 mm, adecuados para el eje de accionamiento del mecanismo. Estos rodamientos permiten un giro suave y estable, con bajo coeficiente de fricción, ideal para aplicaciones de precisión.
- Eje: Se utilizó un eje cilíndrico de acero con un diámetro de 5 mm, sobre el cual se montan tanto el motor como los rodamientos. Este componente transmite el movimiento al núcleo flexible del FishBAC y al filamento de fibra de carbono.
- Filamento de fibra de carbono: se empleó un filamento de fibra de carbono debido a su alta rigidez y peso.

Capítulo 3. Simulación numérica

Parte I. Simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

3.1 Simulación CFD del rotor de una turbina eólica de 2400 W

En este apartado se describe a grandes rasgos el proceso de simulación CFD del rotor de una turbina eólica de 2400 W. Se utilizó el software ANSYS en el módulo FLUENT para esta simulación.

El primer paso es la creación de la geometría, esta incluye 3 álabes, el hub y la góndola, la góndola fue simplificada para ahorrar recursos computacionales, tal como se muestra en la figura 3.1.

Se modelaron dos volúmenes de control, el rotor y el estator. Para dimensionar el volumen del rotor se tomó una relación de bloqueo de 5% para encontrar el diámetro del rotor. La relación de bloqueo se define como la relación entre el área proyectada del modelo y la sección de prueba del túnel del viento (en nuestro caso fue el diámetro del volumen del rotor), véase figura 3.3. El diámetro encontrado fue de 3.25m. La longitud del volumen del rotor es de $1.5D$ (donde D es el diámetro del rotor de 2400 W, $D=2.5\text{m}$), $0.5D$ antes del rotor y $1D$ después del rotor, tal como se muestra en la figura 3.2. Usando una operación booleana se sustrae el volumen de la figura 3.1 al volumen de la figura 3.2, y así obtenemos nuestro volumen del rotor.

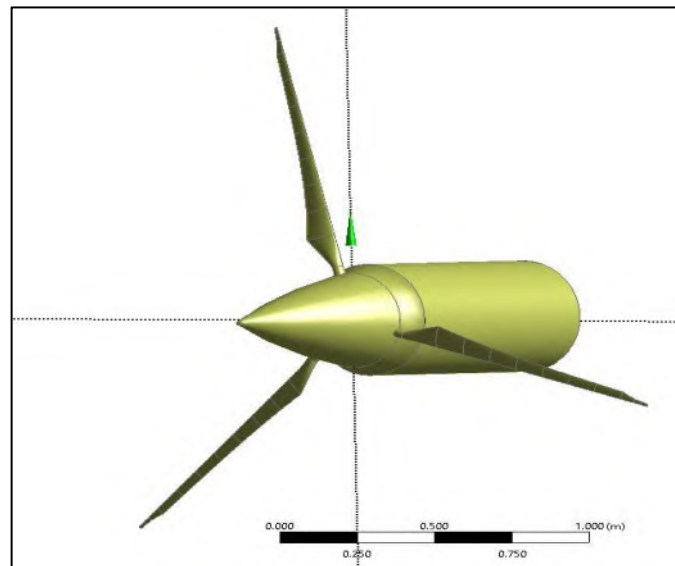


Figura 3.1. Área de bloqueo del rotor de 2400 W.

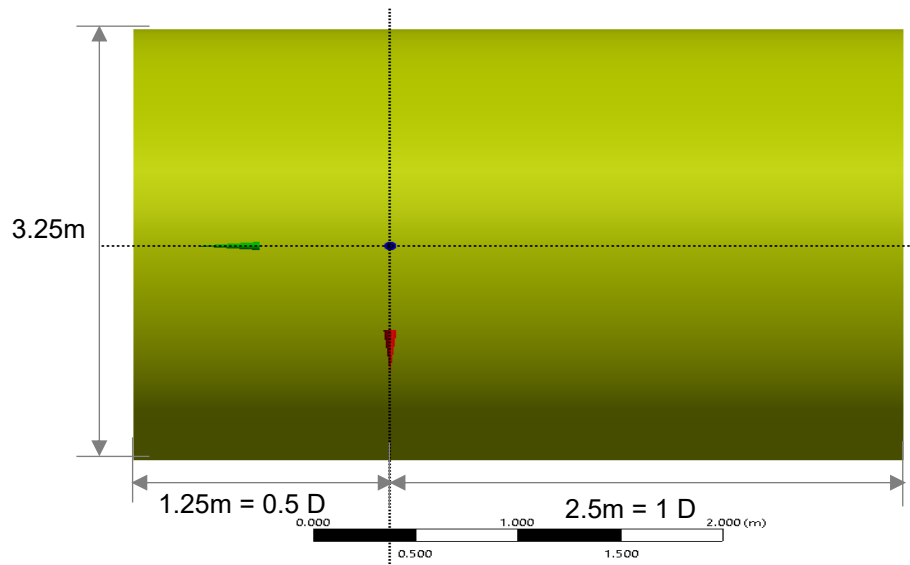


Figura 3.2. Modelado del rotor de 2400 W.

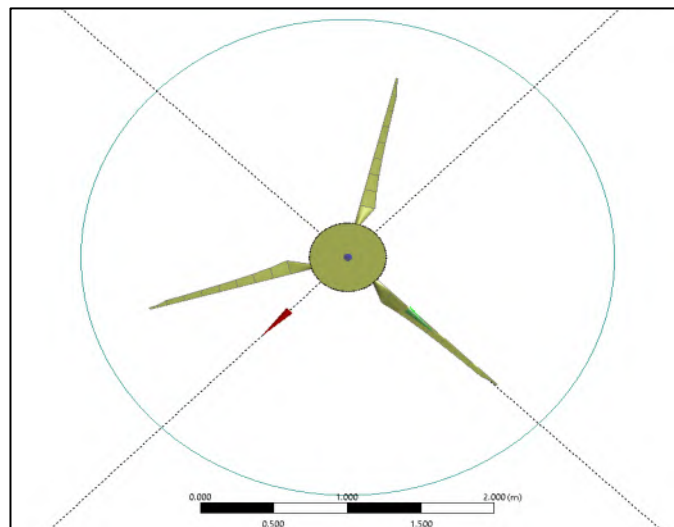


Figura 3.3. Dimensiones del volumen de control del rotor.

En la figura 3.4 vemos un corte transversal del volumen de control del rotor donde ya fue sustraída las geometrías de los 3 álabes, el hub y la góndola.

Para el volumen del estator también se crea un cilindro con un diámetro de $4D$ (10m), la longitud del volumen del estator es de $9D$, $3D$ antes del rotor y $6D$ después del rotor, tal como se muestra en la figura 3.5. Usando una operación booleana se sustrae el volumen del rotor (figura 3.2) al volumen del estator, quedando un cilindro hueco dentro del volumen del estator, tal como muestra la figura 3.6.

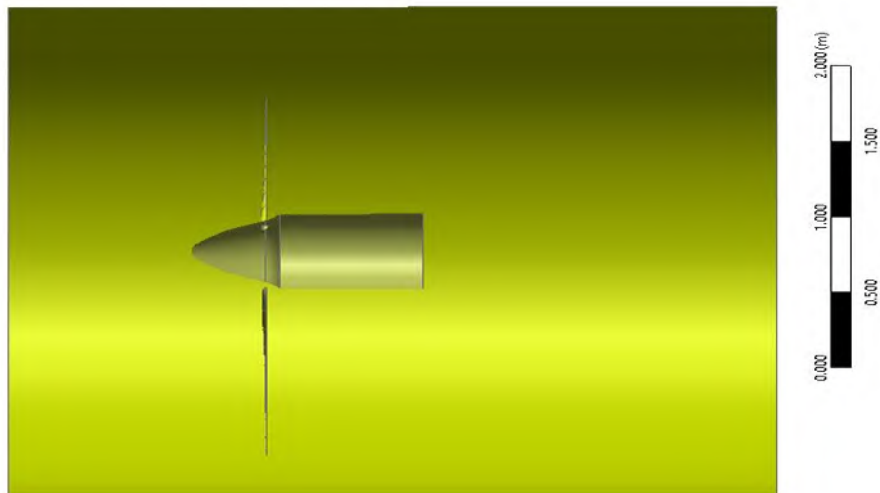


Figura 3.4. Sección transversal del volumen de control del rotor.

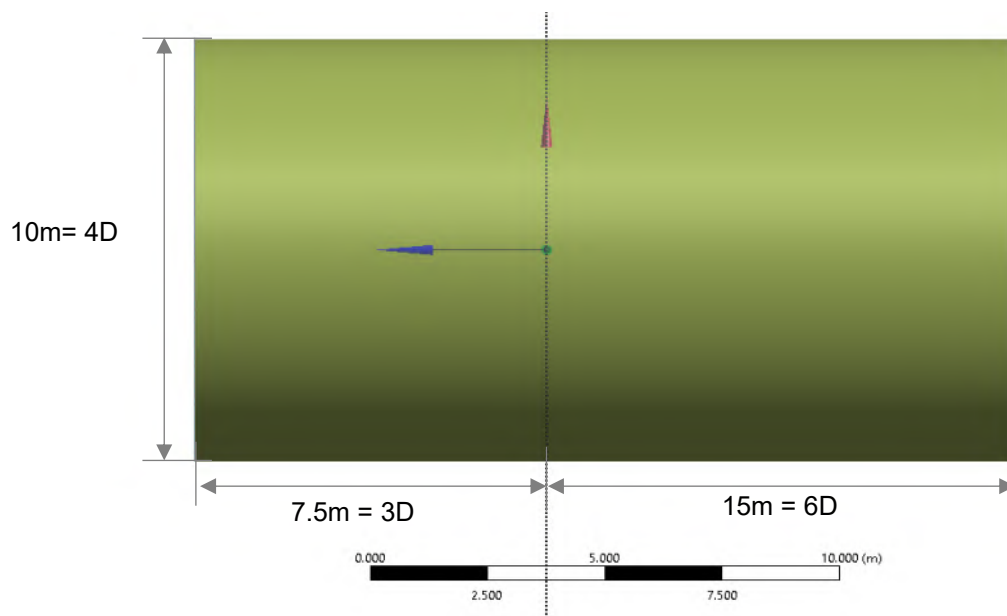


Figura 3.5. Dimensiones del volumen de control del estator.

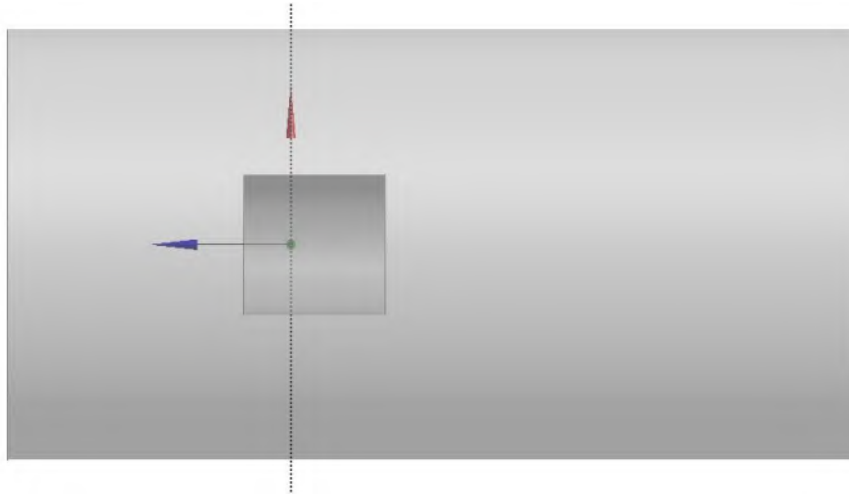


Figura 3.6. Sección transversal del volumen de control del estator.

3.2. Malla del rotor y estator de 2400 W

El diseño de la malla para el dominio computacional del rotor usa una malla no estructurada con elementos tetraédricos, se aplicó el método de Path Independent con las características mostradas en la figura 3.7. Este método de mallado utiliza elementos tetraédricos mediante una técnica de inserción por puntos para lograr mejores refinamientos en geometrías complicadas y es especialmente eficaz en los casos en se necesita una malla precisa. No obstante, puede presentar inconvenientes cuando se autointersecta, debido a la complejidad de la geometría (puntas, ángulos muy agudos, chaflanes, etc.).

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Volumen_rotor
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Independent
Element Order	Use Global Setting
Advanced	
Defined By	Max Element Size
Max Element Size	Default (0.59319 m)
Feature Angle	30.0°
Mesh Based Defeaturing	Off
Refinement	Proximity and Curvature
Min Size Limit	Default
Num Cells Across Gap	10
Curvature Normal Angle	6.0°
Smooth Transition	Off
Growth Rate	Default
Minimum Edge Length	1.1743e-002 m
Write ICEM CFD Files	No

Figura 3.7. Detalles de la configuración de mallado del rotor.

En la figura 3.8 se puede apreciar la malla del rotor, en las zonas que se encuentran cercanas a los álabes la malla tiene un tamaño de elemento más pequeño; las zonas del hub y la góndola tienen un tamaño de elemento pequeño, pero no tanto como en los álabes. Las zonas alejadas de los álabes, el hub y la góndola tienen un tamaño de elemento mayor. La malla tiene 2,999, 031 elementos con 532,247 nodos.

Los parámetros más importantes para indicar la calidad de la malla en una simulación CFD son el esquinamiento y la calidad ortogonal, para la malla del rotor el esquinamiento promedio fue de 0.191, el máximo de 0.62 (en elementos distribuidos en todo el dominio) y el promedio para la Calidad ortogonal fue de 0.8 (véase tabla 3.1). De acuerdo con la tabla 3.2 la calidad de malla para el volumen del rotor se encuentra *acceptable*.

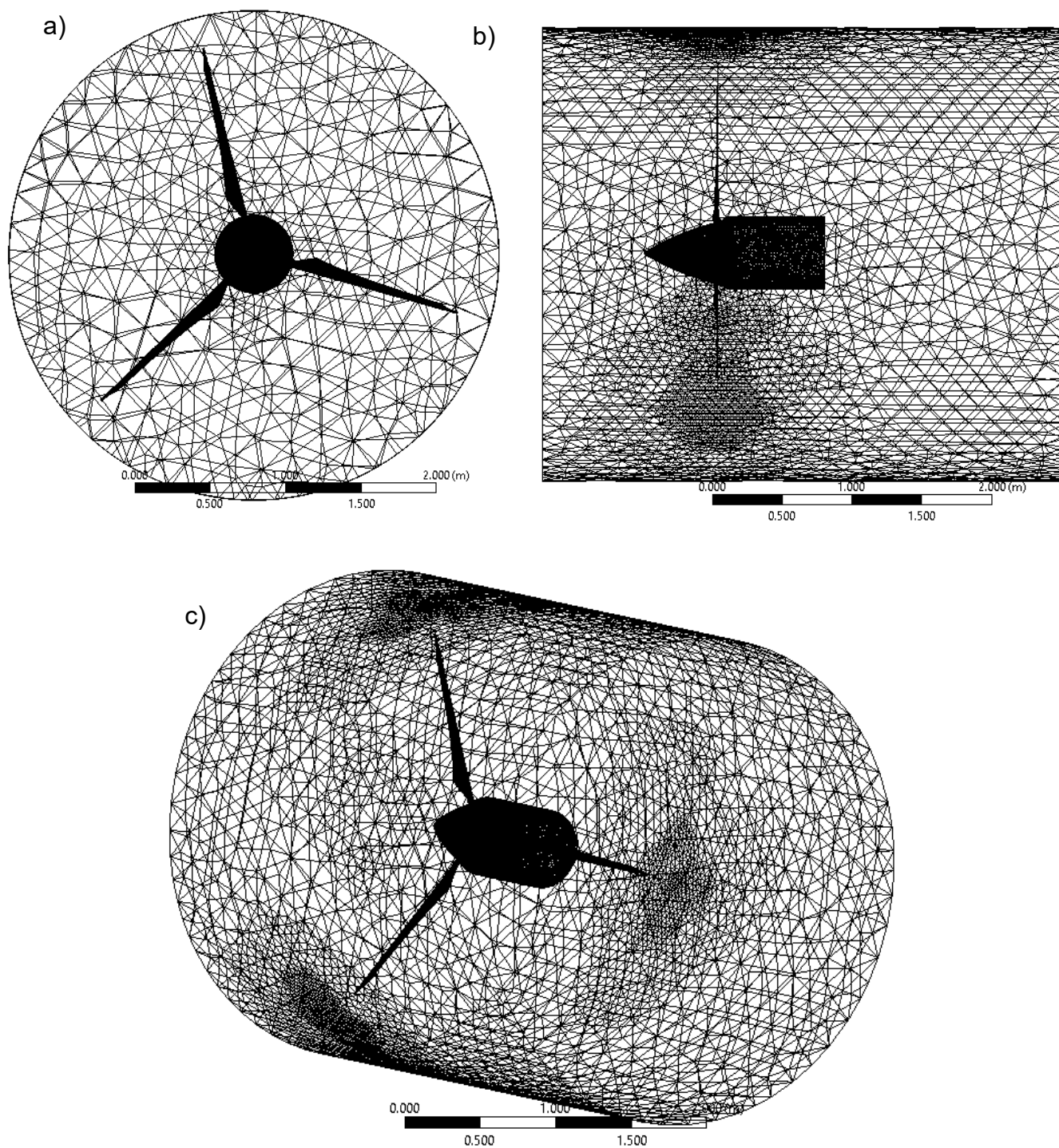


Figura 3.8. Malla del rotor.a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista isométrica.

Tabla 3.1. Métricas de la malla del volumen del rotor a) Esquinamiento b) Calidad ortogonal.

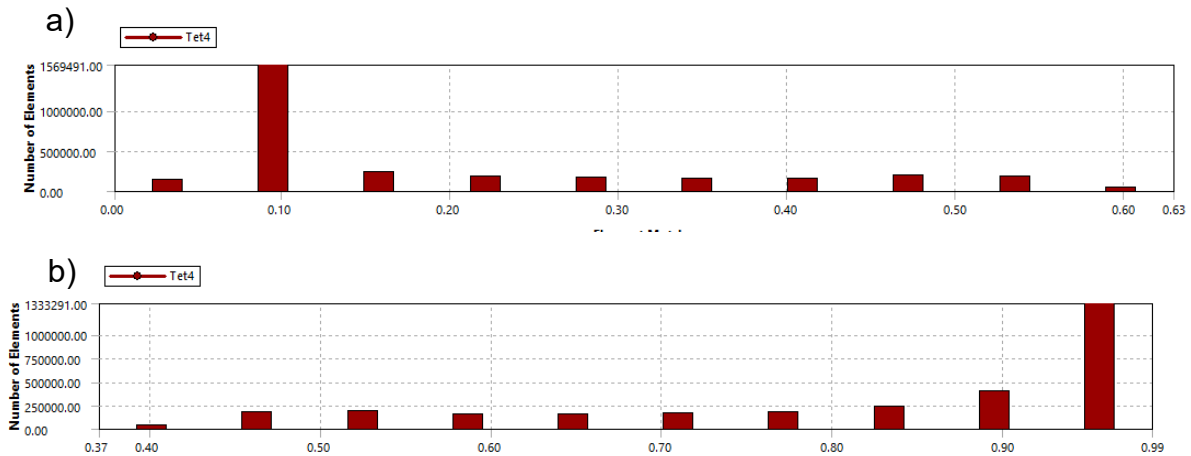


Tabla 3. 2. Rangos de calidad del mallado.

Orthogonal Quality:

Inadecuado	Malo	Suficiente	Buena	Muy Buena	Sobresaliente
0-0,001	0,001-0,15	0,15-0,20	0,20-0,70	0,70-0,95	0,95-1,00

Skewness:

Sobresaliente	Muy Buena	Buena	Suficiente	Malo	Inadecuado
0-0,25	0,25-0,50	0,50-0,80	0,80-0,95	0,95-0,98	0,98-1,00

Para la malla del dominio computacional del estator se empleó una malla no estructurada con elementos tetraédricos, se aplicó el método de Path Independent con las características mostradas en la figura 3.9. Además de Face Sizing en las interfaces con el rotor de entrada y salida.

En la figura 3.10 se muestra la malla del estator, en las zonas de interface con el rotor se aprecia que la malla es más densa un tamaño de elemento más pequeño. La malla tiene 676,764 elementos con 121,126 nodos. El esquinamiento promedio fue de 0.16, el máximo de 0.57 (en elementos distribuidos en todo el dominio) y el promedio para la Calidad ortogonal fue de 0.83 (véase tabla 1). De acuerdo con la tabla 2 la calidad de malla para el volumen del rotor se encuentra *acceptable*.

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Volumen_estator
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Independent
Element Order	Use Global Setting
Advanced	
Defined By	Max Element Size
Max Element Size	Default (2.6575 m)
Feature Angle	30.0°
Mesh Based Defeaturing	Off
Refinement	Proximity and Curvature
Min Size Limit	2.e-002 m
Num Cells Across Gap	Default
Curvature Normal Angle	5.0°
Smooth Transition	Off
Growth Rate	Default
Minimum Edge Length	10.21 m
Write ICEM CFD Files	No

Figura 3.9. Detalles de la configuración de mallado del estator.

En total el número de elementos tomado los dos volúmenes de control es de aproximadamente 3.7 millones. El equipo de cómputo utilizado para realizar las simulaciones cuenta con un procesador Intel(R) Core (TM) i7-9700 CPU @ 3.00GHz 3.00 GHz con 8 núcleos y 32 GB de memoria RAM.

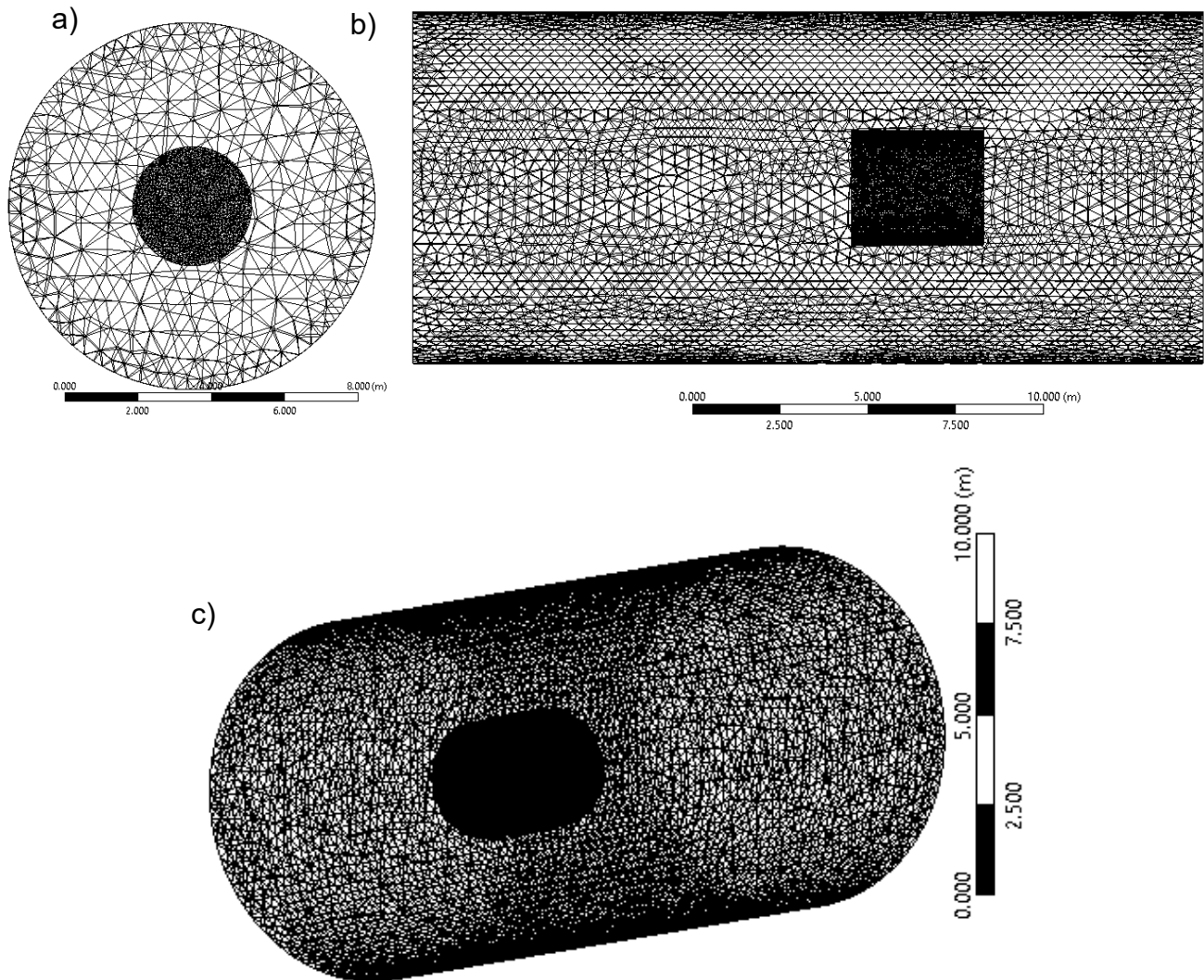


Figura 3.10. Malla del estator. a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista isométrica.

3.3 Condiciones físicas

Empleando el módulo FIUENT en ANSYS se realiza la configuración de las propiedades físicas y condiciones de frontera para la simulación. Las propiedades como densidad del aire (0.95719 kg/m^3), viscosidad del aire ($1.71\text{e-}05 \text{ kg/ms}$), velocidad de entrada (12 m/s) y velocidad de rotación (76.91 rad/s), fueron previamente calculadas al realizar el diseño aerodinámico con la teoría BEM.

Se seleccionó el modelo de turbulencia en viscosidad $k - \omega$ SST con la configuración mostrada en la figura 3.11. Se crea un nuevo fluido de trabajo denominado aire-cu con la densidad y viscosidad mencionadas anteriormente. En la figura 3.12 se muestra la configuración en las condiciones del movimiento de la malla, para el volumen del rotor se define un marco de movimiento en el eje Y y para el volumen del estator se define como estática.

Model	Model Constants
☐ Inviscid ☐ Laminar ☐ Spalart-Allmaras (1 eqn) ☐ k-epsilon (2 eqn) ☒ k-omega (2 eqn) ☐ Transition k-kl-omega (3 eqn) ☐ Transition SST (4 eqn) ☐ Reynolds Stress (7 eqn) ☐ Scale-Adaptive Simulation (SAS) ☐ Detached Eddy Simulation (DES) ☐ Large Eddy Simulation (LES)	Alpha*_inf 1 Alpha_inf 0.52 Alpha_0 0.11111 Beta*_inf 0.09 R_beta 8 R_k 6 R_w 2.95 a1 0.31 Beta_i (Inner) 0.075 Beta_i (Outer) 0.0828 TKE (Inner) Prandtl #
k-omega Model ☐ Standard ☐ GEKO ☐ BSL ☒ SST	
k-omega Options ☒ Low-Re Corrections	
Options ☐ Curvature Correction ☐ Corner Flow Correction ☐ Production Kato-Launder ☒ Production Limiter	
Transition Options Transition Model: none	User-Defined Functions Turbulent Viscosity: none

Figura 3.11. Configuración del modelo de viscosidad.

Fluid	Fluid
Zone Name volumen_estator Material Name: air-cu Edit... ☐ Frame Motion ☐ 3D Fan Zone ☐ Source Terms ☐ Mesh Motion ☐ Laminar Zone ☐ Fixed Values ☐ Porous Zone	Zone Name volumen_rotor Material Name: air-cu Edit... ☒ Frame Motion ☐ 3D Fan Zone ☐ Source Terms ☐ Mesh Motion ☐ Laminar Zone ☐ Fixed Values ☐ Porous Zone
Reference Frame: Mesh Motion Porous Zone 3D Fan Zone Embedded LES Reaction	Reference Frame: Mesh Motion Porous Zone 3D Fan Zone Embedded LES Reaction Source Terms Fixed Values Multiphase
Rotation-Axis Origin X [m] 0 Y [m] 0 Z [m] 0 Rotation-Axis Direction X 0 Y 0 Z 0	Relative Specification Relative To Cell Zone: absolute UDF Zone Motion Function: none Rotation-Axis Origin X [m] 0 Y [m] 0 Z [m] 0 Rotation-Axis Direction X 0 Y 1 Z 0 Rotational Velocity Speed [rad/s] -76.91 Copy To Mesh Motion Translational Velocity X [m/s] 0 Y [m/s] 0 Z [m/s] 0

Figura 3.12. Configuración de los marcos de movimiento para el rotor y estator.

Se definen las condiciones de frontera de entrada con una velocidad de 12m/s y de salida con una presión de 0 Pa, tal como muestra la figura 3.13. También se aprecia en azul los vectores de la velocidad de entrada y el sistema de coordenadas.

En la sección de interfaces de malla se crean las interfaces entre el rotor y estator que son: entrada, salida y contorno; tal como se muestra en la figura 3.14. Deben aparecer marcadas con un numero 1.

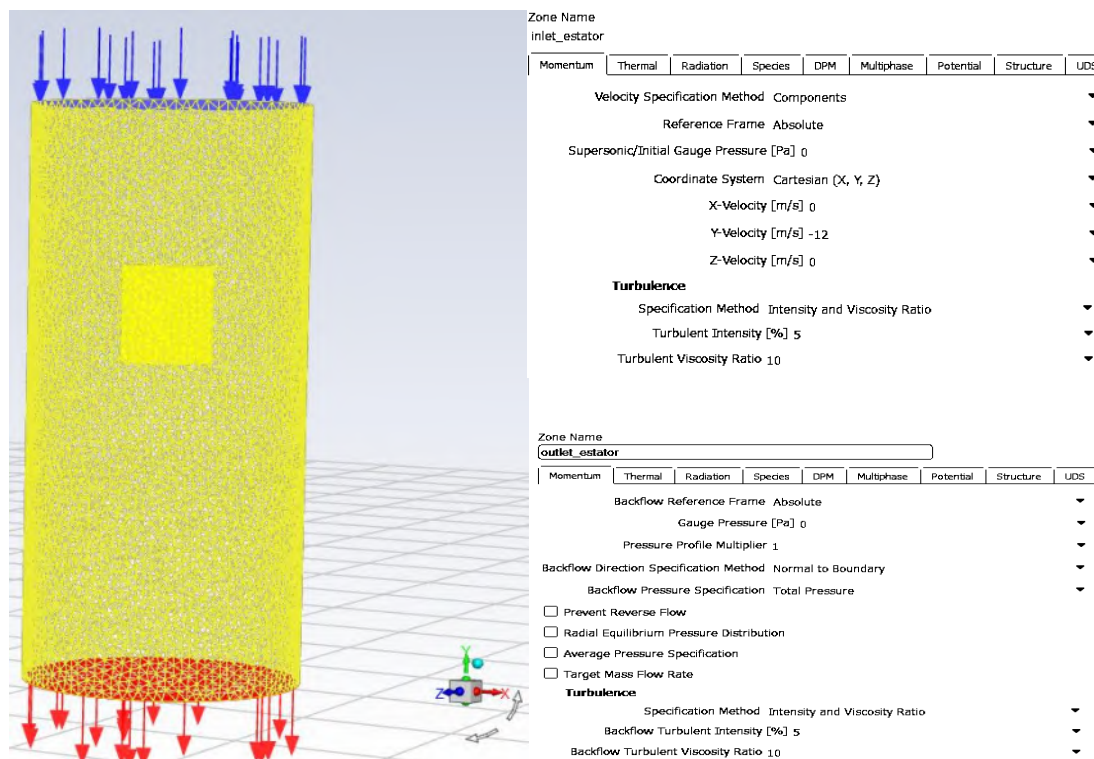


Figura 3.13. Configuración de las condiciones de entrada y salida.

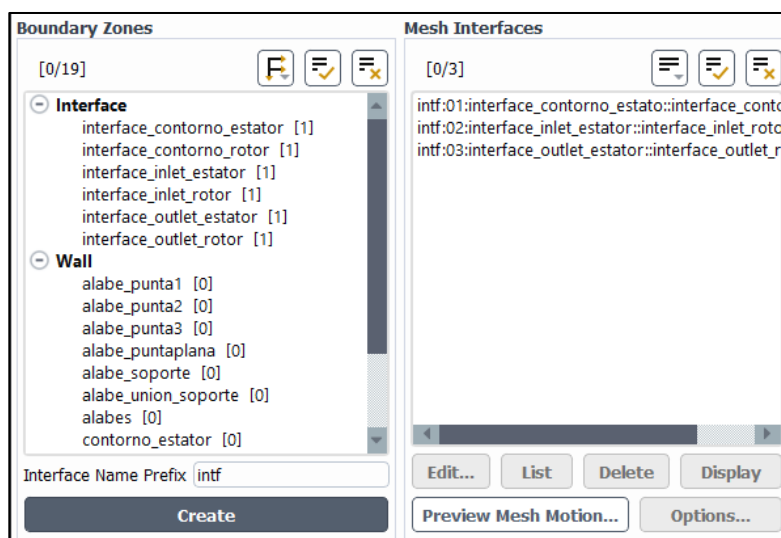


Figura 3.14. Configuración de las interfaces.

Se define el contorno del estator como simetria. Los álabes y el hub se definen como paredes que se mueven alrededor del eje Y, tal como muestra la figura 3.15.

Zone Name: alabe_punta1
Adjacent Cell Zone: volumen_rotor

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential St

Wall Motion: ☐ Stationary Wall ☒ Moving Wall

Motion: ☒ Relative to Adjacent Cell Zone ☐ Absolute Speed [rad/s]: 0

Rotation-Axis Origin: X [m]: 0 Y [m]: 0 Z [m]: 0

Rotation-Axis Direction: X: 0 Y: 1 Z: 0

Shear Condition: ☒ No Slip ☐ Specified Shear ☐ Specularity Coefficient ☐ Marangoni Stress

Wall Roughness: Roughness Models: ☒ Standard ☐ High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness: Roughness Height [m]: 0 Roughness Constant: 0.5

Figura 3.15. Configuración de los álabes y el hub.

Se establecen valores de referencia que pertenecen al volumen del rotor, tal como muestra la figura 3.21.

Reference Values

Compute from: volumen_rotor

Reference Values:

Area [m²]: 2.5
Density [kg/m³]: 0.95719
Enthalpy [J/kg]: 0
Length [m]: 0.036
Pressure [Pa]: 0
Temperature [K]: 288.16
Velocity [m/s]: 1
Viscosity [kg/(m s)]: 1.71e-05
Ratio of Specific Heats: 1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.: 300

Reference Zone: volumen_rotor

Figura 3.16. Valores de referencia.

3.3.1 Configuración del solucionador

En el apartado de métodos de solución se dejó el método preestablecido y se establecieron los límites para los residuales en 0.00001 o $1e-05$. Los valores de inicialización fueron en método estándar con una velocidad de 12m/s. (véase figura 3.17).

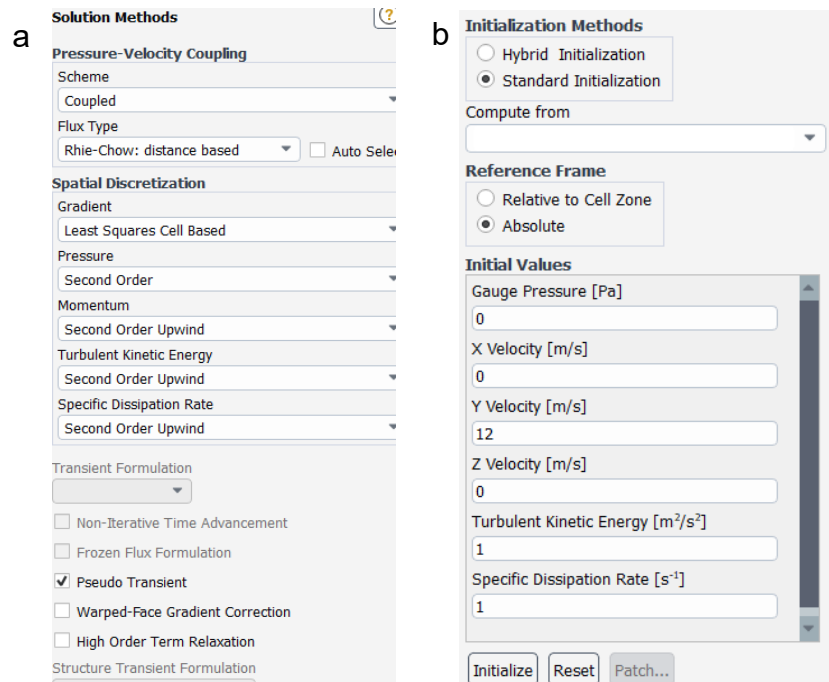


Figura 3.17. Configuración del solucionador a) valores de método de solución b) valores de inicialización.

Para el cálculo se especifican 20000 iteraciones para que los cálculos sean suficientes para llegar a la convergencia de la solución.

3.4 Solución

Los residuales llegaron a una convergencia de $1e-04$ o 0.0001 tal como muestra la figura 3.18, la solución no logro converger hasta $1e-05$, sin embargo, es un resultado *acceptable*.

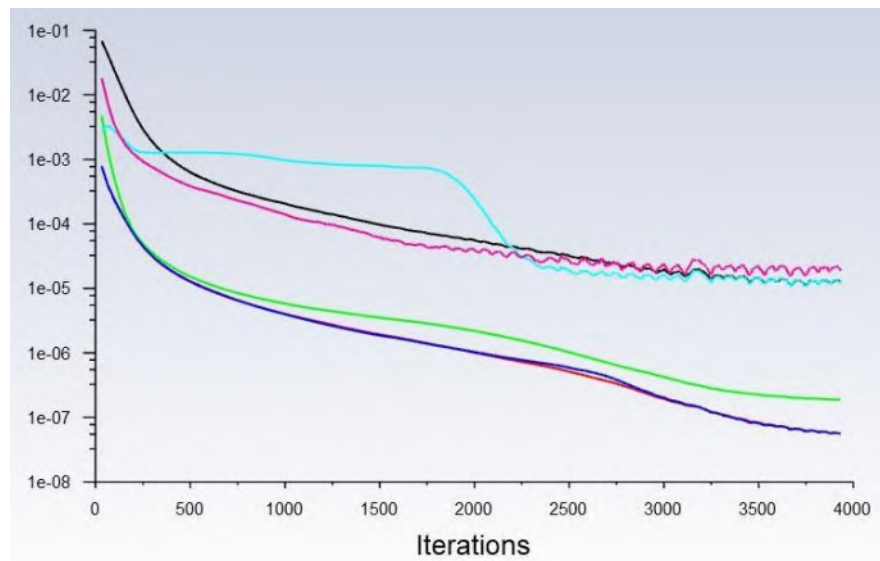


Figura 3.18. Convergencia de los residuales.

3.5 Resultados

De la simulación CFD se obtuvo un momento de 34.31 Nm, al multiplicarlo por la velocidad angular de 76.91 rad/s se obtiene la potencia del rotor de 2639 W, lo cual es un valor muy cercano a la potencia esperada. La diferencia en la potencia del rotor de 2400W obtenidos por los diferentes métodos es mínima, con una diferencia menor al 5% como muestra la tabla 3.3. La comparación entre los distintos métodos nos muestra la validez del diseño aerodinámico.

Tabla 3.3. Potencia de un rotor de 2400 W con FishBAC.

Potencia de un rotor de 2400 W con FishBAC			
Método de calculo	Teoría BEM	Qblade (Teoría BEM y Elemento Vórtice)	CFD (Elemento Finito)
Potencia	2598 W	2639 W	2670 W
% Diferencia	-	1.6	2.8

Parte II. Simulación estructural de álabes mediante elemento finito

3.6 Metodología de simulación estructural

La metodología seguida se muestra en la figura 3.19 y consta de los siguientes pasos:

- Cálculo de cargas de diseño: se determinan las fuerzas y momentos que actuarán sobre el aerogenerador de acuerdo con la norma IEC 61400-2.
- Modelado 3D: se puede representar como una superficie o como un sólido dependiendo de los materiales seleccionados para su manufactura.
- Selección del material y arreglo: se definen las propiedades de los materiales seleccionados, así como el arreglo, incluyendo el número de capas, orientación y espesor.
- Mallado: se discretiza el modelo seleccionando el tipo de malla que mejor se adapte a la geometría, así como el tipo y número de elementos o celdas y grado de refinamiento.
- Definición de las condiciones de frontera y carga: se definen las sujeciones y las fuerzas y momentos que actúan sobre el modelo 3D calculadas de acuerdo con la norma IEC 61400-2.
- Análisis de convergencia de malla: se verifica la precisión de los resultados en función de la calidad de malla.
- Resultados: se analizan los datos obtenidos para evaluar el comportamiento estructural del álabe.

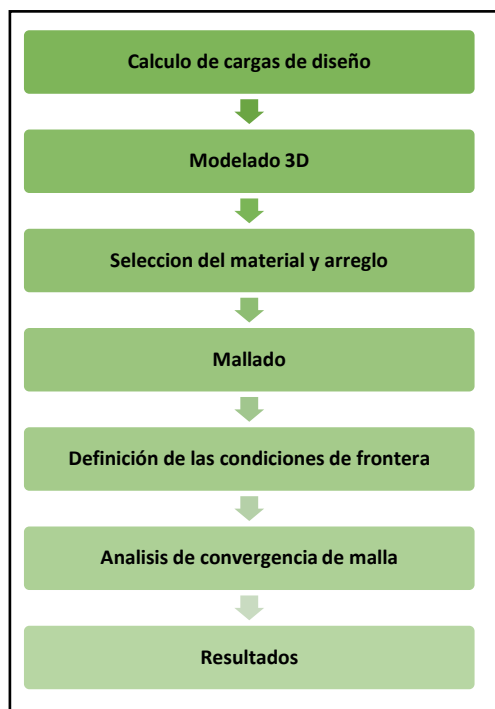


Figura 3.19. Metodología de simulación estructural.

3.7 Cargas de diseño para aerogeneradores pequeños

La norma indica tres formas para determinar las cargas de diseño de la turbina eólica:

1) Metodología de cargas simplificadas: se indica un conjunto limitado de hipótesis de carga y de configuraciones con fórmulas sencillas y condiciones externas simplificadas [40].

2) Modelo de simulación: este procedimiento utiliza un modelo de simulación dinámico estructural combinado con el aerogenerador y las hipótesis adecuadas de aplicación [40].

3) Modelo de carga a escala real

Además, la norma requiere un ensayo estático de los álabes.

3.7.1 Sistema de ejes de un aerogenerador pequeño de eje horizontal

En la figura 3.20 se muestra el sistema de ejes para un aerogenerador de eje horizontal de acuerdo con la Norma IEC 61400-2. Además, se deben tomar las siguientes consideraciones:

Eje

- x_{eje} es tal que un momento positivo del eje x actúa en la dirección de giro.
- y_{eje} y z_{eje} no se utilizan.
- El sistema de ejes del eje gira con la góndola.

Álabe

- x_{eje} es tal que el momento positivo del eje x actúa en la dirección de giro.
- y_{eje} es tal que el momento positivo actúa flexionando la punta del álabe hacia sotavento.
- z_{eje} es positivo hacia la punta de la pala.

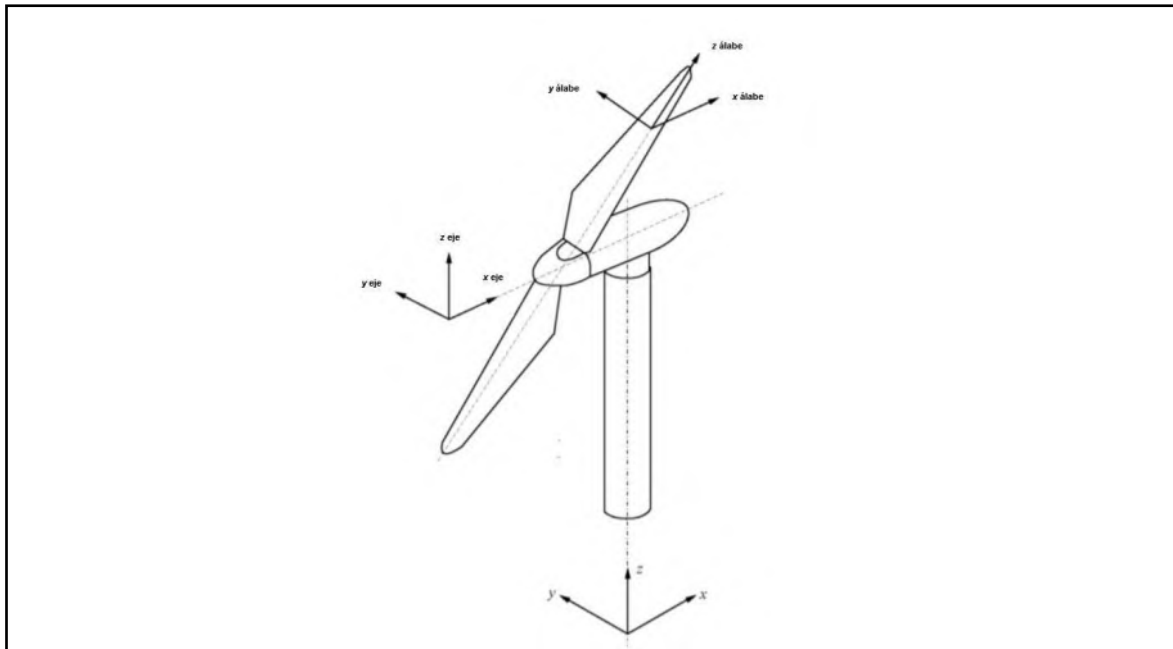


Figura 3.20. Sistema de ejes de un aerogenerador de eje horizontal [40].

3.7.2 Hipótesis de carga para el método de cargas simplificadas

A efectos de diseño, la vida útil de un Aerogenerador Pequeño (AP) se puede representar por un conjunto de estados de diseño que cubran las condiciones más significativas que pueda experimentar el aerogenerador [40]. En la tabla 3.5 se muestran las hipótesis de carga para la metodología simplificada

Tabla 3.5. Hipótesis de carga de diseño para la metodología de cargas simplificadas [40].

 Hipótesis de carga de diseño para la metodología de cargas simplificadas			
Situación de diseño	Hipótesis de carga		Tipo de análisis
Producción de energía	A	Operación normal	F
	B	Orientación	U
	C	Error de orientación	U
	D	Empuje máximo	U
Producción de energía de más ocurrencia de fallo	E	Velocidad de rotación máxima	U
	F	Cortocircuito en la conexión de carga	U
Parada	G	Desconexión (frenado)	U
Carga extrema del viento	H	Carga extrema del viento	U
Condiciones de inmovilización y de falta	I	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	U
Transporte, montaje, mantenimiento y reparación	J	Deberá estar indicado por el fabricante	U

En la tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos para cada hipótesis de carga de diseño para la metodología de cargas simplificadas para el álabe diseñado.

Tabla 3.6. Cargas de diseño calculadas de acuerdo con la metodología simplificada (SLM).

Cargas del SLM					
Hipótesis de carga	Ecuación	Descripción	Valor SML	Unidades	Símbolo
A - Operación normal (carga de fatiga)	Cargas del álabe				
	9.4 (IEC 21)	Fuerza centrífuga en la raíz del álabe (eje z)	8199.91	N	ΔF_{zB}
	9.5 (IEC 22)	Lead-lag Momento flector en raíz (eje x)	30.59	Nm	ΔM_{xB}
	9.6 (IEC 23)	Flapwise Momento flector en raíz (eje y)	97.11	Nm	ΔM_{yB}
	Cargas del eje				
	9.7 (IEC 24)	Empuje en el eje (eje x)	350.14	N	$\Delta F_{x-shaft}$
	9.8 (IEC 25)	Momento de torsión en el eje x	53.33	Nm	$\Delta M_{x-shaft}$
	9.9 (IEC 26)	Momento flector en el eje	84.13	Nm	ΔM_{shaft}
	9.16 (IEC 28)	Flapwise Momento flector en raíz (eje y)	111.14	Nm	M_{yB}
	9.11,12 (IEC 29,30)	Momento de flexión en el eje	165.84	Nm	M_{shaft}
B - Orientación (momentos y fuerzas)	9.13 (IEC 31)	Flapwise Momento flector en raíz (eje y)	238.30	Nm	M_{yB}
C - Error de orientación	9.14 (IEC 32)	Máximo empuje en el eje	1053.81	N	$F_{x-shaft}$
D - Empuje máximo	9.15 (IEC 33)	Fuerza centrífuga en la raíz del álabe (eje z)	7298.65	N	F_{zB}
E - Velocidad de rotación máxima	9.16 (IEC 34)	Momento de flexión en el eje	43.50	Nm	M_{shaft}
F - Cortocircuito en la conexión a la carga	9.17 (IEC 35)	Momento de flexión en el eje	101.97	Nm	$M_{x-shaft}$
	9.18 (IEC 36)	Lead-lag Momento de flexión en raíz (eje x)	33.99	Nm	M_{xB}
G - Desconexión (frenado)	9.19 (IEC 37)	Momento de flexión en el eje	n/a	Nm	$M_{x-shaft}$
	9.20 (IEC 38)	Lead-lag Momento flector en raíz (eje x)	n/a	Nm	M_{xB}
H - Carga extrema del viento	9.23,24 (IEC 39,40)	Flapwise Momento flector en raíz (eje y)	216.55	Nm	M_{yB}
	9.25,26 (IEC 41,42)	Máximo empuje en el eje	1041.11	N	$F_{x-shaft}$

La Norma IEC 61400-2 en su sección 7.8 nos indica que para la metodología de cargas simplificadas, en el caso de cargas de fatiga se debe considerar un factor de seguridad de 1; mientras que para las cargas críticas el factor de seguridad es de 3.

En la tabla 3.7 se resumen las cargas máximas del álabe para cada eje, aplicadas a una distancia de 1/3 de la longitud del álabe medido desde la punta. Para el eje z, la hipótesis con el mayor valor fue la hipótesis de carga A. Operación normal; para el eje x, la hipótesis con el mayor valor fue la hipótesis de carga F. Cortocircuito en la conexión a la carga y para el eje y la hipótesis de carga C Error de orientación.

Tabla 3.7. Cargas máximas del álabe

Cargas estructurales del álabe		
Fuerza centrífuga en la raíz de la pala	Lead-lag Momento flector en la raíz	Flapwise Momento flector en la raíz
(eje z)	(eje x)	(eje y)
N	Nm	Nm
8199.9	102.0	714.9

3.8 Modelo 3D

La base del método de los elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos [48].

ANSYS es un software de simulación por elemento finito, el cual fue empleado para realizar la simulación numérica de los ensayos estructurales del álabe bajo las cargas marcadas por la norma.

El modelo 3D del álabe se realizó en un SolidWorks, un programa de elemento finito y simulación. En este modelo no se incluyó la sección que corresponde al dispositivo FishBAC, ya que tiene el objetivo de permitir un cambio de curvatura suave y fue manufacturado con un material flexible, por lo que su función no es soportar la rigurosidad de las cargas marcadas por la norma IEC 61400-2. La sección del álabe que está diseñada para soportar estas cargas es la que se muestra en la figura 3.21, la parte del extradós, el intradós (en verde) y un larguero (en verde fuerte) proporcionan la rigidez estructural al álabe necesaria para soportar las cargas marcadas en la norma.

Se modeló el álabe como un conjunto de 26 superficies como se muestra en la siguiente figura. Este álabe está diseñado con un perfil NACA 4412, tiene una longitud de 1373mm y una cuerda máxima de 108 8mm.

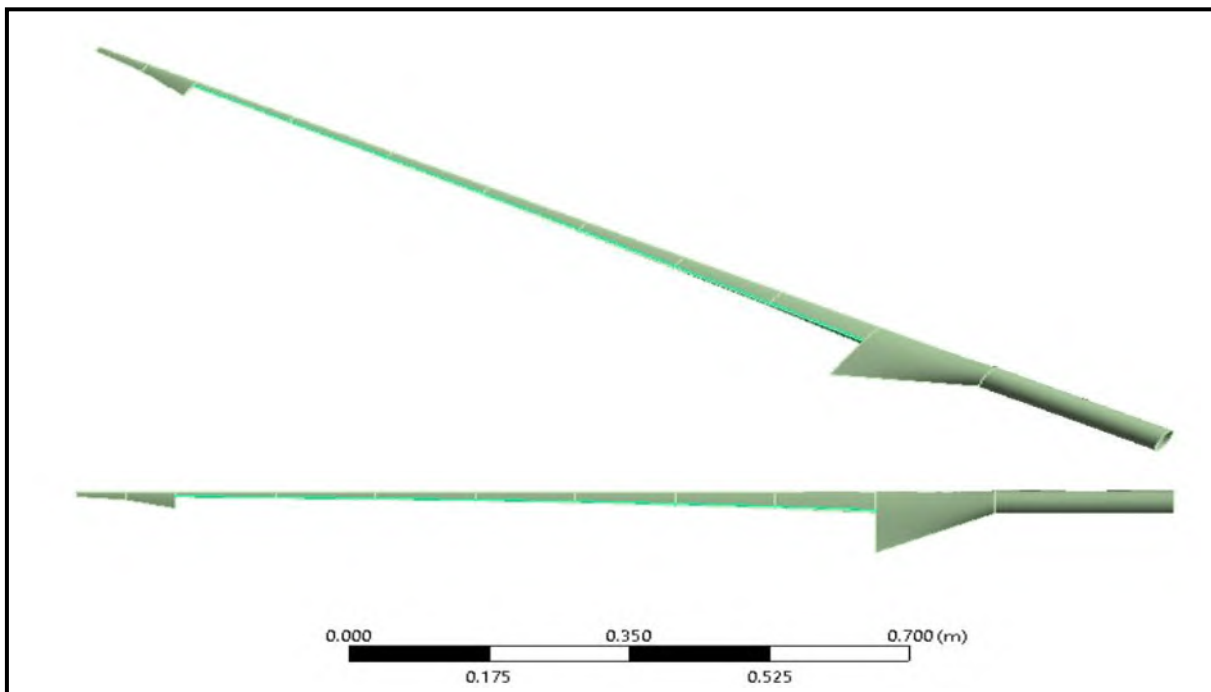


Figura 3.21. Modelado del álabe como superficies.

3.9 Material

Se utilizó fibra de vidrio unidireccional y bidireccional con resina epoxi, los valores de las propiedades fueron tomados de Barnes et. al [49], donde los autores realizan un análisis estructural a álabes para alta y baja velocidad de viento. Las propiedades de los materiales laminados se enlistan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Propiedades de la fibra de vidrio con resina epoxi [49].

Propiedad		$\pm 45^\circ$ ángulo lámina fibra de vidrio/epoxi	Unidireccional 90° lámina fibra de vidrio/epoxi
E_1	Modulo longitudinal, GPa	25	39
E_2	Modulo transversal, GPa	25	8.3
E_3	Modulo transversal, GPa	18	8.3
G_{12}	Modulo cortante, GPa	6.3	4.1
ν_{12}	Razón de Poisson	0.38	0.26
$\bar{\sigma}_{1t}$	Resistencia a tensión, MPa	511	1062
$\bar{\sigma}_{1c}$	Resistencia a compresión, MPa	628	610
$\bar{\sigma}_{2t}$	Resistencia a tensión, MPa	511	31
$\bar{\sigma}_{2c}$	Resistencia a compresión, MPa	628	118
$\bar{\sigma}_{3t}$	Resistencia a tensión, MPa	28	31
$\bar{\sigma}_{3c}$	Resistencia a compresión, MPa	138	118
$\bar{\tau}_{12}$	Esfuerzo córtate en el plano	790	72
ρ	Densidad	1900	1900

3.10 Malla

El mallado del álabé se hizo usando el método de triángulos debido a que el aspa es hueca y fue modelada como una superficie. Se empleó el mapeo de malla en todas las caras, con un tamaño promedio de elemento de 2 mm y aplicando un refinamiento en los bordes de ataque y de salida. La malla se muestra en detalle en la figura 3.22.

Para la malla del álabé, se generaron dos tipos de elemento: triángulos con 3 nodos para la sección del extradós y del intradós; y elementos hexaédricos de 20 nodos en la parte del larguero. Respecto a la calidad de la malla en general cumple con los requerimientos mínimos de calidad (Véase anexo B), tal como se muestra en la tabla 3.9.

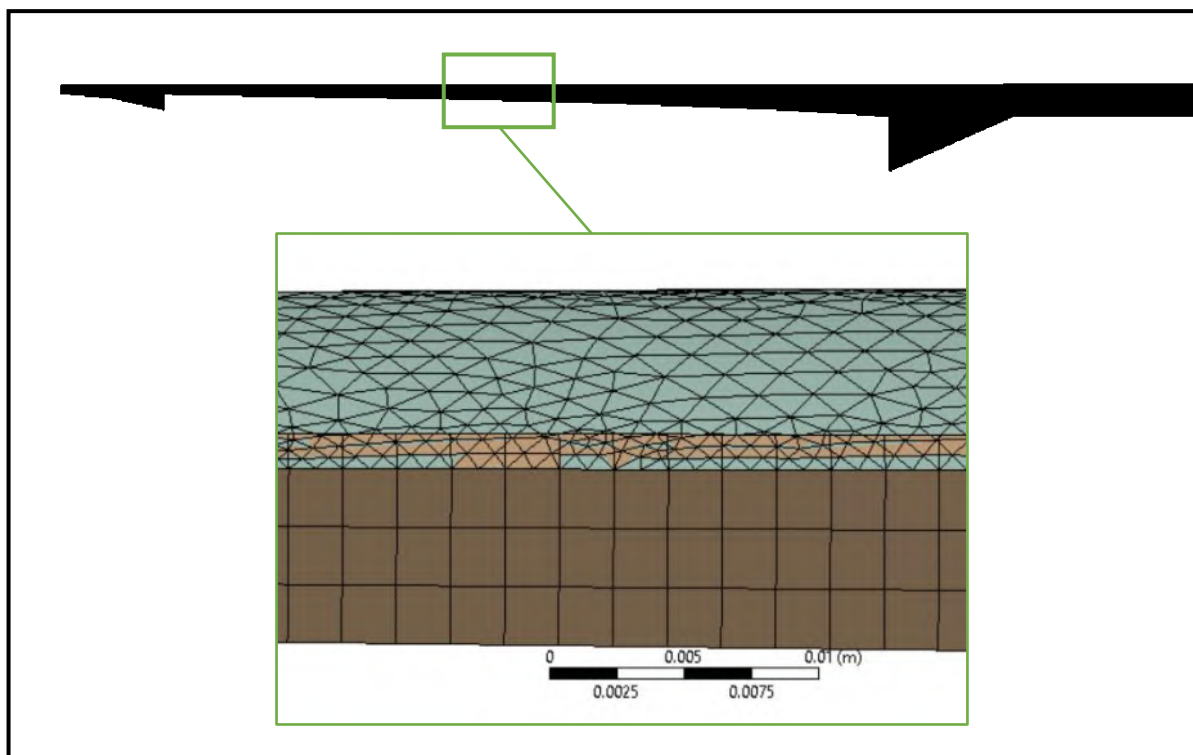


Figura 3.22. Mallado del álabe como superficies.

Tabla 3.9 Parámetros de la calidad de malla.

Parametros de la calidad de malla		
Parametro	Promedio	Calidad
Tamaño de malla (mm)	2	-
Tipo de elemento	Tri3/ Hex20	-
Número de nodos	104542	-
Número de elementos	203659	-
Relación de aspecto	1.1939	Muy bien
Calidad ortogonal	0.96955	Muy bien
Esquinamiento	0.04932	Muy bien
Calidad del elemento	0.96565	Muy bien
Ángulo de esquina máximo	85.009°	Muy bien
Relación Jacobiana	1.002	Muy bien
Desviación paralela	0.3617	Muy bien
Factor de deformación	0.003226	Muy bien

3.11 Módulo para materiales compuestos (ACP)

ANSYS Composite PrepPost (ACP) permite definir los parámetros de las estructuras compuestas por capas, tales como, número de capas, así como el material, espesor y orientación; para realizar el análisis de estas estructuras. En la figura 3.23 se muestra un esquema de la adecuada conexión entre los módulos ACP Pre y ACP Post para un análisis estructural.

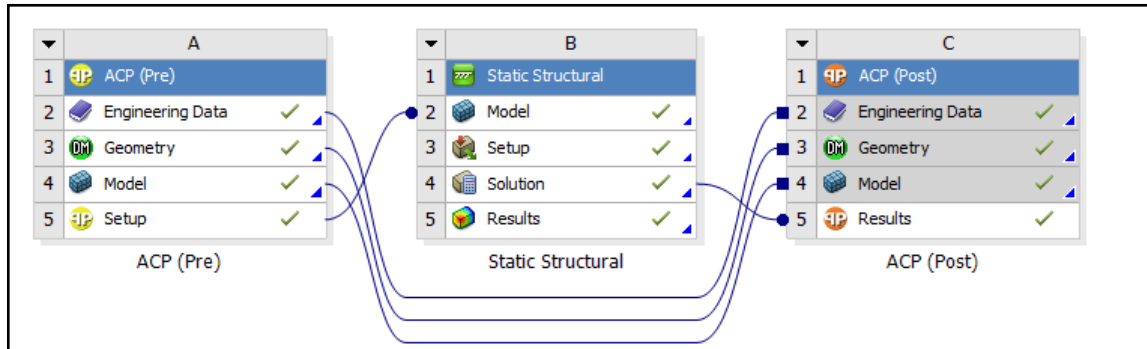


Figura 3.28. Proceso del módulo ACP de ANSYS [50].

En el módulo para materiales compuestos del software FEM se modeló la estructura compuesta del álabo utilizando fibra de vidrio unidireccional. Se le dio un espesor de 0.7mm por capa y se orientó cada capa en la dirección de la envergadura. Se definieron 4 capas a lo largo de todo el álabo. Con un arreglo de 2 capas unidireccionales, 1 bidireccional y 1 unidireccional, comenzando desde la capa más externa. En la figura 3.24 podemos ver el espesor y la dirección de orientación de las fibras. El larguero tiene el mismo arreglo de capas.

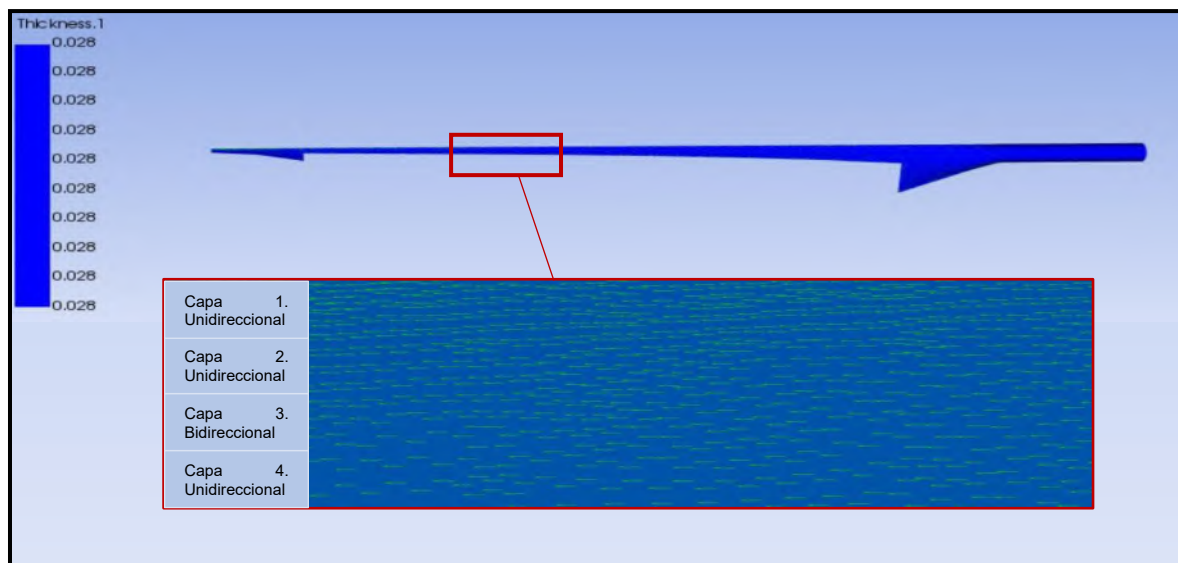


Figura 3.24. Espesor del álabo y orientación de las fibras.

3.12 Condiciones de frontera

Para realizar el análisis estructural se tomó en cuenta la fuerza ejercida por la gravedad que se muestra en amarillo, se especificaron como soportes fijos las áreas marcadas en azul, y las cargas estructurales (ubicadas a 1/3 medido desde la punta) mostradas en la tabla 3.7 se encuentran en rojo. Las figuras 3.25, 3.26 y 3.27 corresponden a la Fuerza en z, Flapwise y Lead-lag respectivamente.

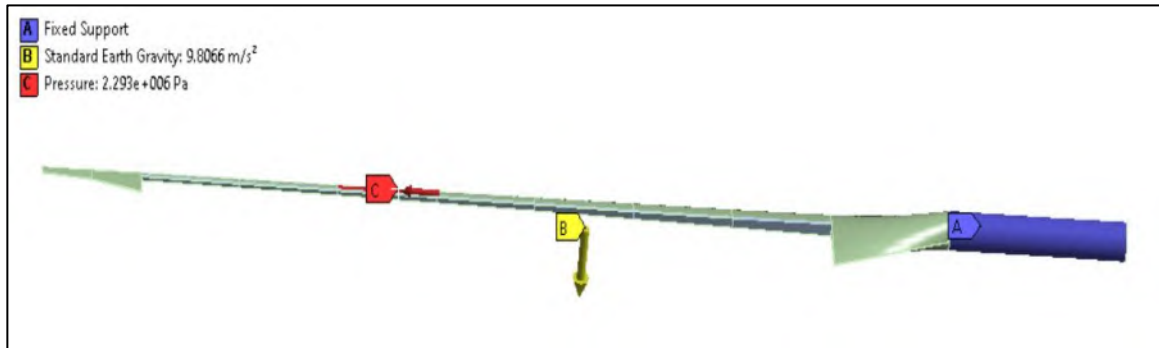


Figura 3.25. Condiciones de frontera para Fuerza en z (Hipótesis de carga A).

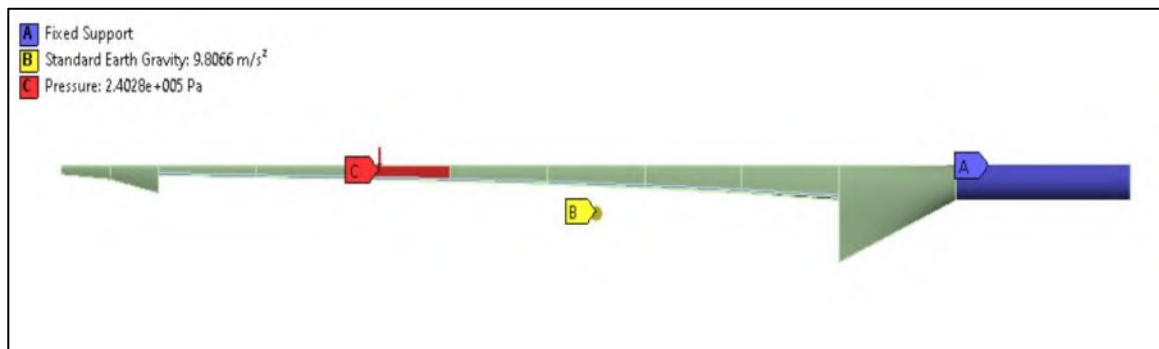


Figura 3.26. Condiciones de frontera para Flapwise (Hipótesis de carga C).

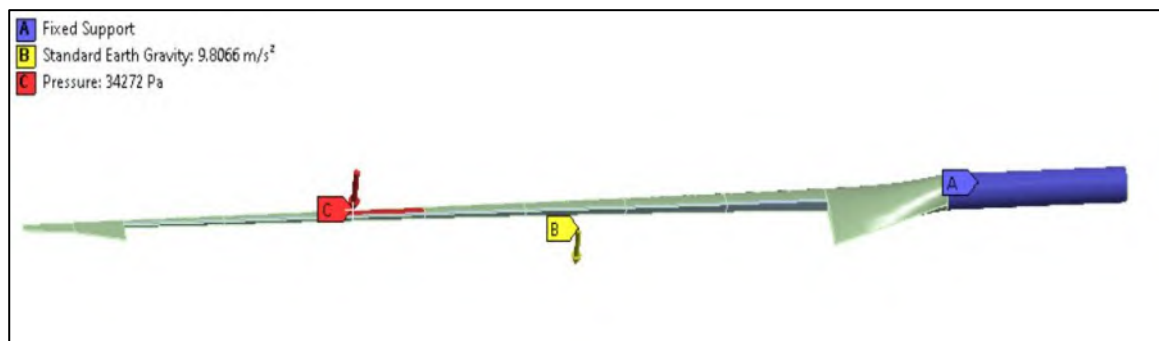


Figura 3.27. Condiciones de frontera para Lead-lag (Hipótesis de carga F).

3.13 Análisis de convergencia de malla

En el modelado de elementos finitos, una malla más refinada, por lo general, da como resultado una solución más precisa. Sin embargo, a medida que la malla se vuelve más refinada, el tiempo de cálculo aumenta. Por lo que es necesario realizar un análisis de convergencia de malla para obtener resultados exactos al menor costo computacional.

En la figura 3.28 y en la tabla 3.10, se muestra el análisis de convergencia de malla donde para el tamaño de malla a partir de 6mm se aprecia que el porcentaje de variación del esfuerzo es menor al 5%. Tomamos la convergencia en 2mm con 104542 nodos y 203659 elementos.

Tabla 3.10. Parámetros de la calidad de la malla.

Tamaño de malla (mm)	Número de nodos	Número de elementos	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Porcentaje de variación del esfuerzo (%)	Desplazamiento Total (mm)
6	89718	174052	232.95	0.72206849	295.88
5	90114	174839	238.21	2.25799528	296.22
4	91151	176907	243.39	2.17455187	296.15
3	93797	182189	243.7	0.1273676	296.19
2	104542	203659	243.55	-0.06155109	296.34
1	199927	394369	244.8	0.51324163	296.6
0.9	234033	462568	250.37	2.2753268	296.62
0.8	284533	563551	249.17	-0.47929065	296.64
0.7	358068	710600	249.45	0.11237308	296.66
0.6	471226	936885	245.06	-1.75987172	296.67



Figura 3.28. Convergencia de malla.

3.14 Resultados de la simulación numérica.

3.14.1 Desplazamiento total

Las figuras 3.29, 3.30 y 3.31, muestran el desplazamiento total del álabe para la Fuerza en z, Flapwise y Lead-lag respectivamente. Ejemplifica la distribución que tienen los desplazamientos, como es de esperar en la punta es donde se tiene el mayor valor para el desplazamiento y en la zona pegada a la raíz y en el soporte los desplazamientos tienden a cero debido a que se encuentra la condición de un soporte fijo.

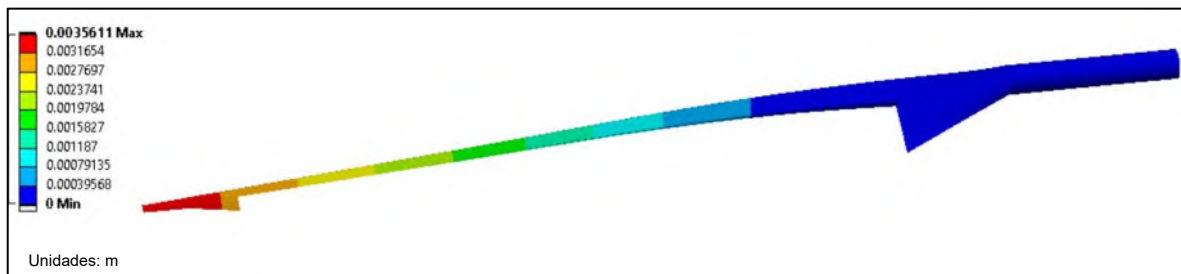


Figura 3.29. Desplazamiento total para Fuerza en Z (Hipótesis de carga A).

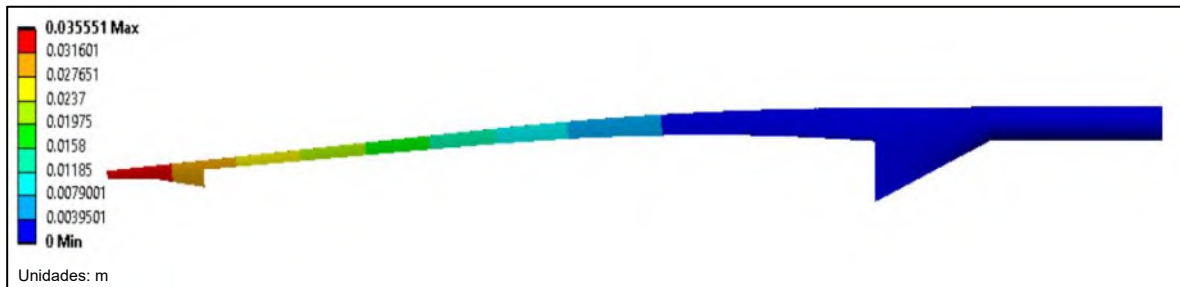


Figura 3.30. Desplazamiento total para Flapwise (Hipótesis de carga C).

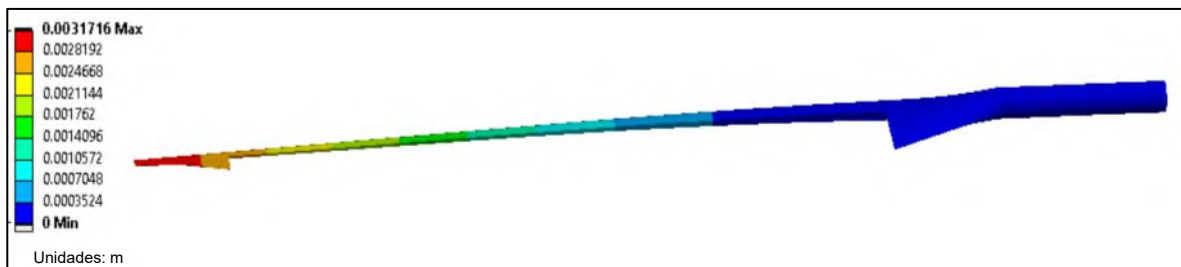
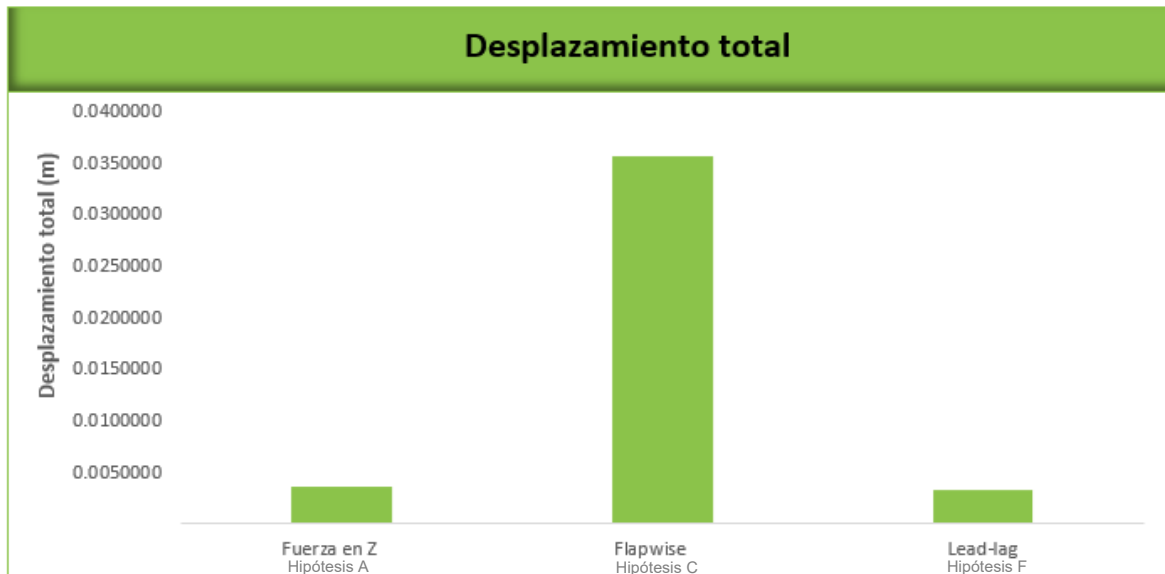


Figura 3.31. Desplazamiento total para Lead-lag (Hipótesis de carga F).

La figura 3.32, muestra los valores para el desplazamiento total del álabe para la Fuerza en Z, Flapwise y Lead-lag. El mayor desplazamiento se presenta en Flapwise y el menor para Lead-lag. Son desplazamientos muy pequeños y aceptables. Lo cual se debe al larguero que soporta las cargas en Lead-lag, pero no contribuye en el sentido de Flapwise.

Figura 3.32. Desplazamiento total.



3.14.2 Desplazamiento direccional

Las figuras 3.33, 3.34 y 3.35, muestran el desplazamiento direccional del álabe en el eje y y para la Fuerza en Z, Flapwise y Lead-lag respectivamente. En el caso de Flapwise el mayor desplazamiento se da en las zonas en rojo, mientras que para el caso de Lead-lag y Fuerza en Z el mayor desplazamiento se da en la zona en azul (debido al signo del sentido del eje).

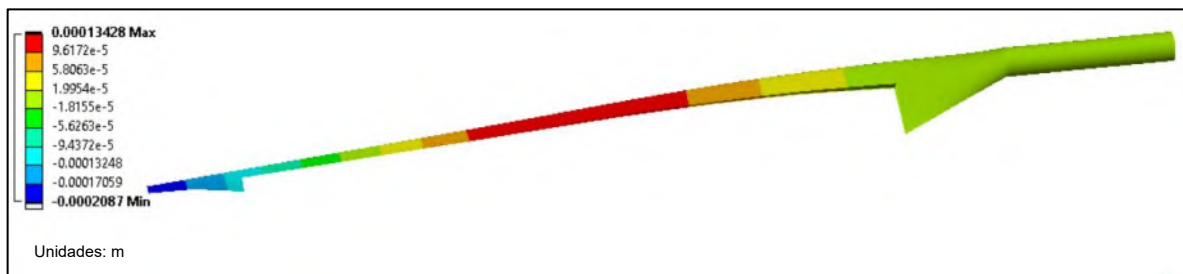


Figura 3.33. Desplazamiento direccional para Fuerza en z (Hipótesis de carga A).

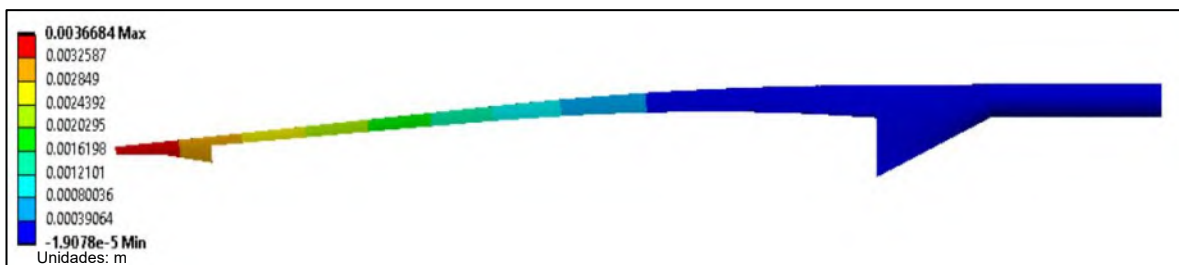


Figura 3.34. Desplazamiento direccional para Flapwise (Hipótesis de carga C).



Figura 3.35. Desplazamiento direccional para Lead-lag (Hipótesis de carga F).

La figura 3.36, muestra los valores para el desplazamiento direccional del álabe para la Fuerza en Z, Flapwise y Lead-lag. El mayor desplazamiento se presenta en Flapwise y el menor para la Fuerza en Z. Aunque esperaríamos el mismo comportamiento en los tres casos de carga, en el caso de la Fuerza en Z el desplazamiento máximo en rojo se da en la mitad del álabe y no en la punta como en los otros casos de carga. Los desplazamientos son muy pequeños en todos los casos.

Figura 3.36. Desplazamiento direccional.

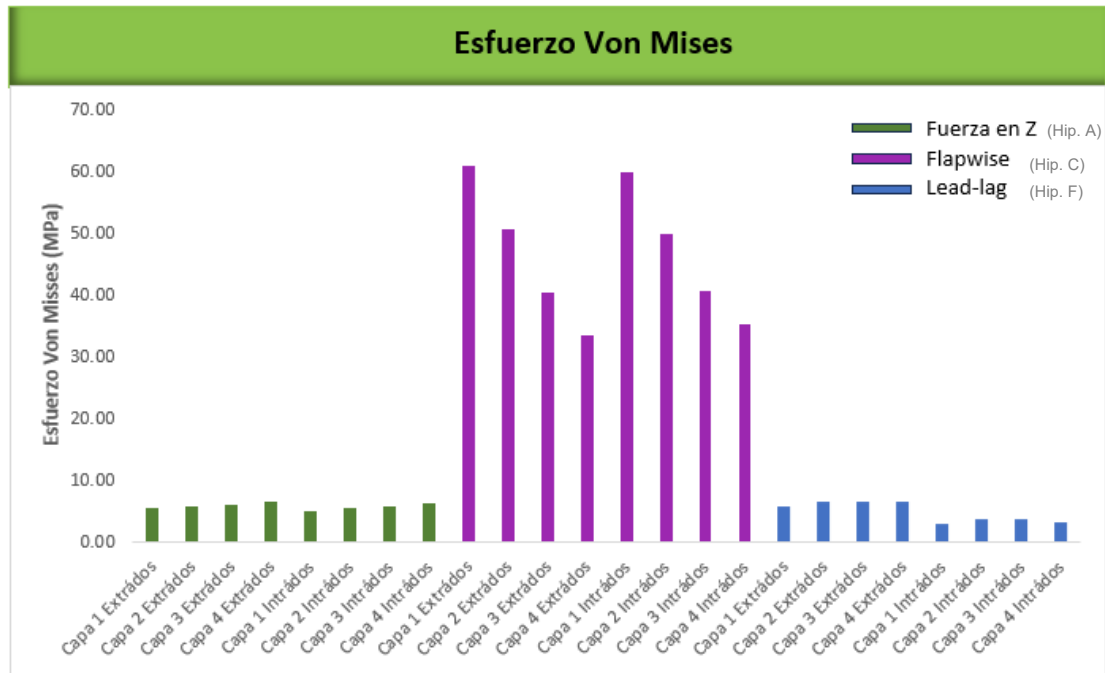


3.14.3 Esfuerzo de Von Mises

La figura 3.37, muestran los valores para el esfuerzo de Von Mises por capa del álabe: la Fuerza en Z mostrado en verde, Flapwise mostrado en morado y Lead-lag, mostrado en azul.

Los valores mayores se dan para la Flapwise, son significativamente mayores a los otros casos. Los valores de los esfuerzos para la Fuerza en Z y Lead-lag tienen un rango de valores muy similar. Para el caso de Flapwise los esfuerzos tienen un comportamiento espejo en el intradós y extradós; en el caso de la Fuerza en Z, los esfuerzos también tienen un comportamiento de espejo entre el extradós y el intradós; y para el Lead-lag tiene un comportamiento no uniforme debido probablemente al soporte, sin embargo, son pequeños.

Figura 3.37. Esfuerzo de Von Mises.



3.14.4 Criterio de fallo

Las figuras 3.38, 3.39 y 3.40, muestran el criterio de fallo Tsai -Wu del álabe en el eje para la Fuerza en Z, Flapwise y Lead-lag respectivamente. En todos los casos se da en la misma zona del soporte el valor mínimo. El valor máximo para Flapwise y Lead-lag se ubica en donde comienza la raíz del álabe, esto debido al cambio de geometría brusco, mientras que para la fuerza en Z se da en la zona de aplicación de la carga de diseño.

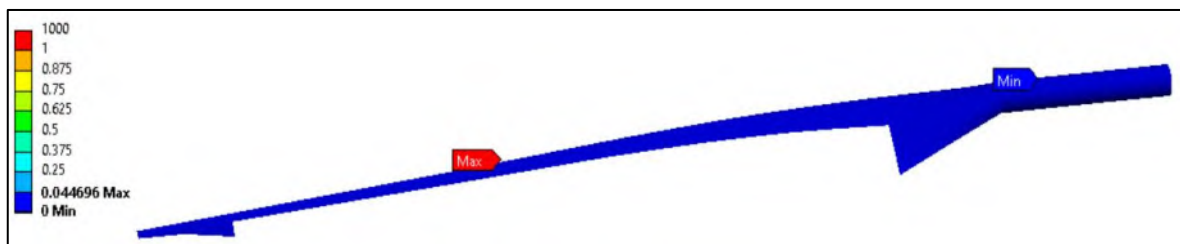


Figura 3.37. Tsai-Wu para Fuerza en z (Hipótesis de carga A).

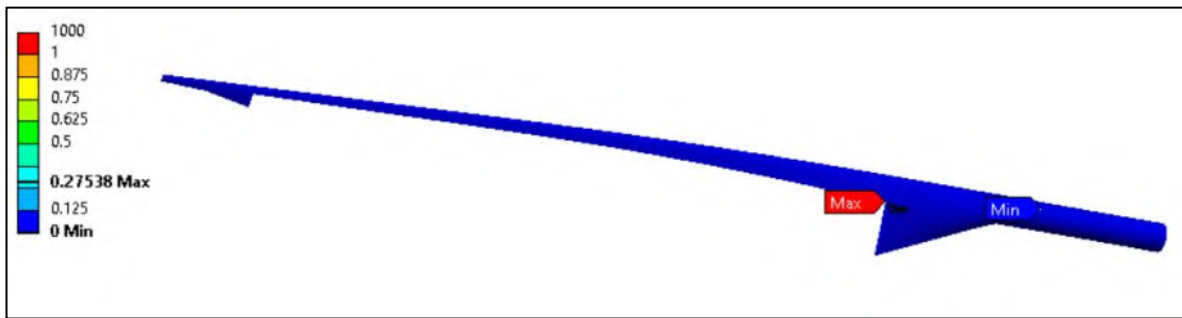


Figura 3.38. Tsai-Wu para Flapwise (Hipótesis de carga C).

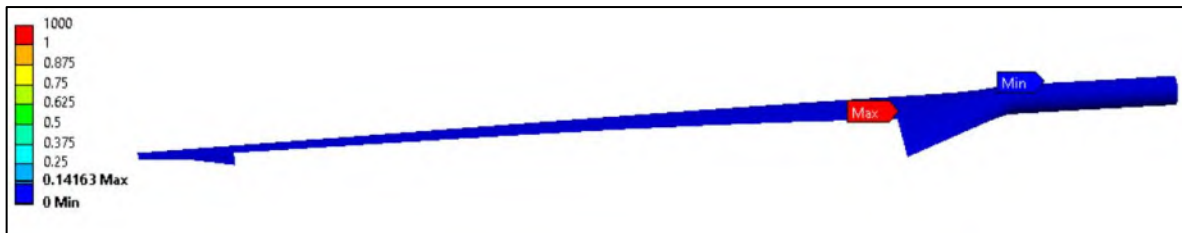
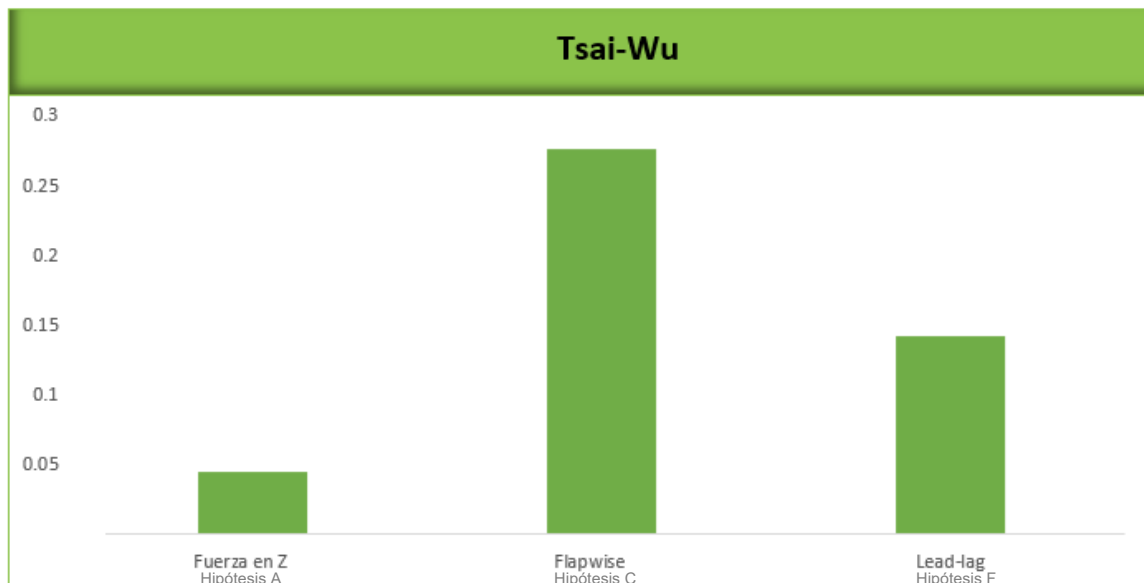


Figura 3.39. Tsai-Wu para Lead-lag (Hipótesis de carga F).

La figura 3.40, muestra los valores para el Tsai-Wu del álabe para la Fuerza en Z, Flapwise y Lead-lag. El Flapwise presenta el mayor valor de Tsai-Wu, sin embargo, se encuentra por debajo de 1, lo que significa que el álabe no fallara. Todos los valores son muy pequeños por lo que estructuralmente el álabe no fallara.

Figura 3.40. Criterio de Tsai-Wu



Capítulo 4. Manufactura del álabe con FishBAC

Parte I. Manufactura con materiales compuestos

4.1. Introducción

El moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) es una variante simplificada del método RTM tradicional; es un sistema muy similar al del RTM estándar, pero la resina es introducida en la parte baja del molde a través de bajas presiones, o inclusive por gravedad. Como las presiones de trabajo son muy reducidas, los moldes no deben ser tan robustos; esto permite construirlos con materiales más económicos, como los materiales compuestos. Sin embargo, los moldes deben ser ahora herméticos para garantizar el éxito del proceso. Para ello se dota a la periferia del molde de una junta dinámica, que consiste en una doble canal estanca que es sometida a un vacío parcial antes de permitir el ingreso de la resina en el interior del molde[75]

Ventajas

- Las piezas obtenidas poseen buen acabado superficial en las dos caras.
- La productividad del proceso es elevada, máximo 3 piezas por día para un mismo molde.
- Los laminados resultantes poseen buenas propiedades mecánicas (los porcentajes de refuerzo pueden variar en un amplio rango, en función de la finalidad de la pieza).
- Debido a la utilización de contramoldes, se ejerce un mayor control sobre los espesores.
- El proceso se considera como un paso intermedio hacia la automatización de la producción.
- Los controles durante todo el proceso son mayores.
- La utilización de preformas reduce sensiblemente los costes y los tiempos de proceso.
- Las pérdidas de material se ven reducidas por lo sistemático del proceso.
- Se reducen las operaciones de mecanizado posteriores al desmoldeo.
- Al ser un proceso de moldeo cerrado, se reducen las emisiones de COV.
- Se pueden construir tanto estructuras monolíticas como sándwich, aunque en el caso de las segundas deben considerarse especialmente durante la etapa de diseño de moldes.

Desventajas

- El principal inconveniente del proceso es su elevado coste en equipos, especialmente en los moldes y el equipo.
- Los moldes deben ser especialmente concebidos, no siendo posible la reutilización de moldes destinados a otros procesos.
- La incorporación de mecanismos de control de temperatura en los mismos aumenta considerablemente su coste.

- Es necesaria una distribución de planta e infraestructura específica para poder optimizar la producción.
- La mano de obra debe ser altamente especializada.
- El proceso presenta limitaciones para realizar formas de grandes dimensiones.
- El proceso no es apto para producciones medias y bajas.

a) Infusión

El proceso de infusión consiste en varias etapas: primero se disponen las fibras de refuerzo secas sobre el molde; si la pieza lo requiere, se puede pintar el molde con gelcoat previamente. A continuación, todo el conjunto es compactado mediante presión de vacío por medio de una bolsa, para extraer el aire atrapado entre capas de laminado. Una vez compactado el laminado seco, se permite el paso de resina catalizada a través de mangueras estratégicamente distribuidas sobre todo el molde. La distribución de la resina sobre el laminado es ayudada por medio de las estructuras textiles que actúan como una gran membrana porosa. Una vez lleno de resina todo el conjunto, se mantiene bajo depresión hasta que se efectúe la polimerización de la resina. Dicha polimerización se realiza a temperatura ambiente, aunque pueden reducirse los tiempos de curado mediante la aportación de calor externo [75].

Ventajas

- Se obtienen piezas laminadas con buenas propiedades mecánicas (porcentajes de refuerzo sumamente interesantes 40-55%). La calidad tiene menor dependencia del operario.
- Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles al ambiente de trabajo se ven notablemente reducidas. El ambiente de trabajo es más agradable, menos cargado y en general más pulcro.
- El coste de los equipos auxiliares es similar al del proceso de laminado asistido por vacío.
- El coste de los moldes es bajo, y se pueden reconvertir los moldes de proceso abierto.
- El tiempo de fabricación es menor que el de otras técnicas, como por ejemplo el laminado por vacío. La mano de obra necesaria es menor.
- Al producirse piezas por completo (one shot) se reducen las uniones secundarias. Pueden utilizarse la mayoría de las estructuras textiles.
- Se pueden realizar tanto estructuras monolíticas como sándwich.
- Existe un importante ahorro de materia prima y una reducción de los residuos.
- No existen limitaciones del tamaño de pieza.
- En la construcción de piezas de gran tamaño, el proceso posee la mejor relación coste/calidad.

Desventajas

- Es necesaria la utilización de equipos auxiliares de vacío.
- El proceso de infusión emplea materiales fungibles, lo cual aumenta ligeramente el coste.
- La utilización de materiales de refuerzo específicos encarece el proceso.
- Las resinas que se utilizan deben poseer una viscosidad muy baja.
- El proceso requiere de mano de obra especializada.
- La productividad del proceso no es muy elevada.
- El proceso puede verse afectado por las condiciones ambientales.
- Existe dificultad para obtener espesores constantes. Los excesos de resina que deben ser removidos aumentan el tiempo de saneamiento.
- El acabado superficial sólo es bueno por una de las dos caras.
- El proceso no es rentable para producción de piezas pequeñas.

4.2 Metodología de manufactura VARTM

El método de manufactura empleado es VARTM (vacuum-assisted resin transfer molding), un proceso de fabricación de materiales compuestos que implica la inyección de resina en un molde bajo la ayuda de un vacío.

Los pasos para seguir en la metodología son (véase figura 4.1):

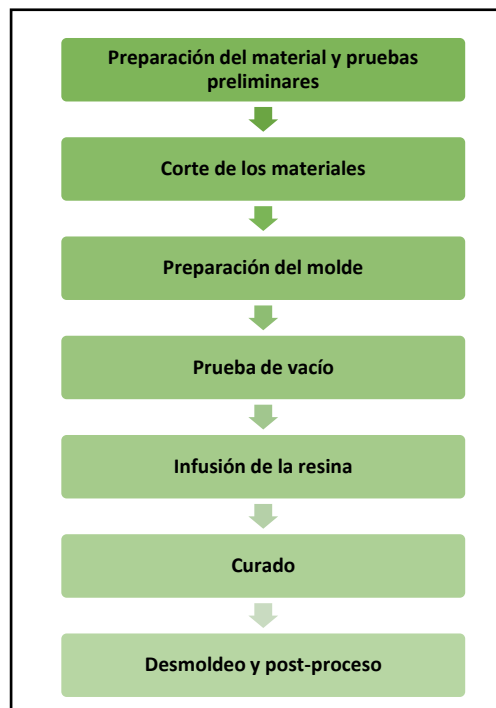


Figura 4.1. Metodología general (elaboración propia).

1.-Preparación del material y pruebas preliminares

- Materiales por emplear: Determinar la cantidad y disponibilidad de los materiales como fibra de vidrio uniaxial y biaxial, fibra natural, resina epóxica, catalizadores, malla de flujo, tela desmoldante, bolsa de vacío, conectores, etc.
- Pruebas de tiempo de trabajo de la resina: Realizar pruebas de tiempo de trabajo de la resina bajo las condiciones temperatura y humedad.
- Condiciones ambientales: Registrar las condiciones de temperatura y humedad del lugar de trabajo, dado que pueden influir en la calidad del proceso de infusión y curado.

2.-Corte de los materiales

- Corte de consumibles: Cortar las capas de fibra de vidrio, la malla de flujo, la tela desmoldante, la bolsa de vacío a medida, la manguera, etc.

3.-Preparación del molde

- Limpieza del molde: Asegurarse de que el molde esté limpio y seco, sin residuos que puedan afectar la calidad del producto final.
- Aplicación del agente desmoldante: Aplicar adecuadamente un agente desmoldante sobre la superficie del molde para facilitar la extracción de las probetas curadas.
- Colocación de capas: Colocar las capas de fibra de vidrio, malla de flujo, tela desmoldante y demás consumibles sobre el molde, asegurando que estén bien alineadas y distribuidas según el diseño predefinido. Véase figura 4.2.

4.-Prueba de vacío

- Sellado del sistema de vacío: Colocar la bolsa de vacío sobre el conjunto del molde y asegurarse de que esté correctamente sellada, sin fugas de aire.
- Prueba inicial de vacío: Aplicar vacío al sistema y verificar que no haya pérdidas en conectores, uniones o bolsas. Verificar que el vacío se mantiene por 15 min.

5.-Infusión de la resina

- Preparación de la resina: Mezclar la resina epoxi con su agente catalizador en las proporciones recomendadas por el fabricante, teniendo en cuenta el tiempo de trabajo de la mezcla.

- Infusión controlada: Iniciar la infusión de la resina dentro del molde mientras se mantiene el vacío. Supervisar que la resina fluya correctamente por todas las capas de fibra de vidrio, sin dejar áreas secas ni exceso de resina.
- Control de parámetros: Monitorear la presión del vacío y la velocidad de infusión para garantizar una impregnación uniforme de la resina.

6.-Curado

- Proceso de curado: Una vez que todo el material compuesto esté completamente impregnado, proceder al curado con mantas térmicas u horno a una temperatura de entre 80-85°C, durante un periodo de 6 a 8 horas aproximadamente.
- Enfriamiento controlado: Tras el curado, permitir que el material se enfríe de manera controlada hasta alcanzar la temperatura ambiente para evitar la formación de tensiones internas o deformaciones, aproximadamente 24 hrs.

7.-Desmoldeo y post-proceso

- Retiro de las probetas: Desmoldear las probetas con cuidado para evitar daños en las piezas. Inspeccionar visualmente las probetas para asegurar que no haya defectos superficiales.
- Acabado final: Realizar el corte de las probetas, por medios mecánicos o laser para cumplir con las especificaciones requeridas para los ensayos.

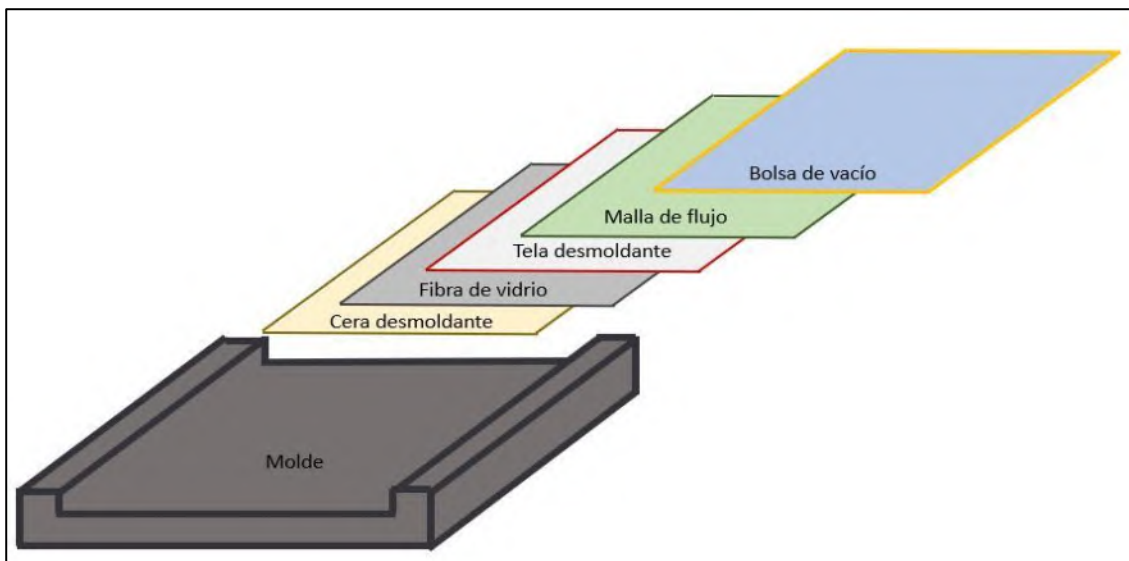


Figura 4.2. Acomodo del material sobre el molde.

4.3 Pruebas de manufactura

En la figura 4.3 se muestra el modelado 3D de los moldes del intradós y extradós de una sección del álabe. Los moldes fueron maquinados por Reparaciones Industriales S.A. de C.V. en un centro de maquinado, utilizando como material Nylamid, como se muestra en la figura 4.4.

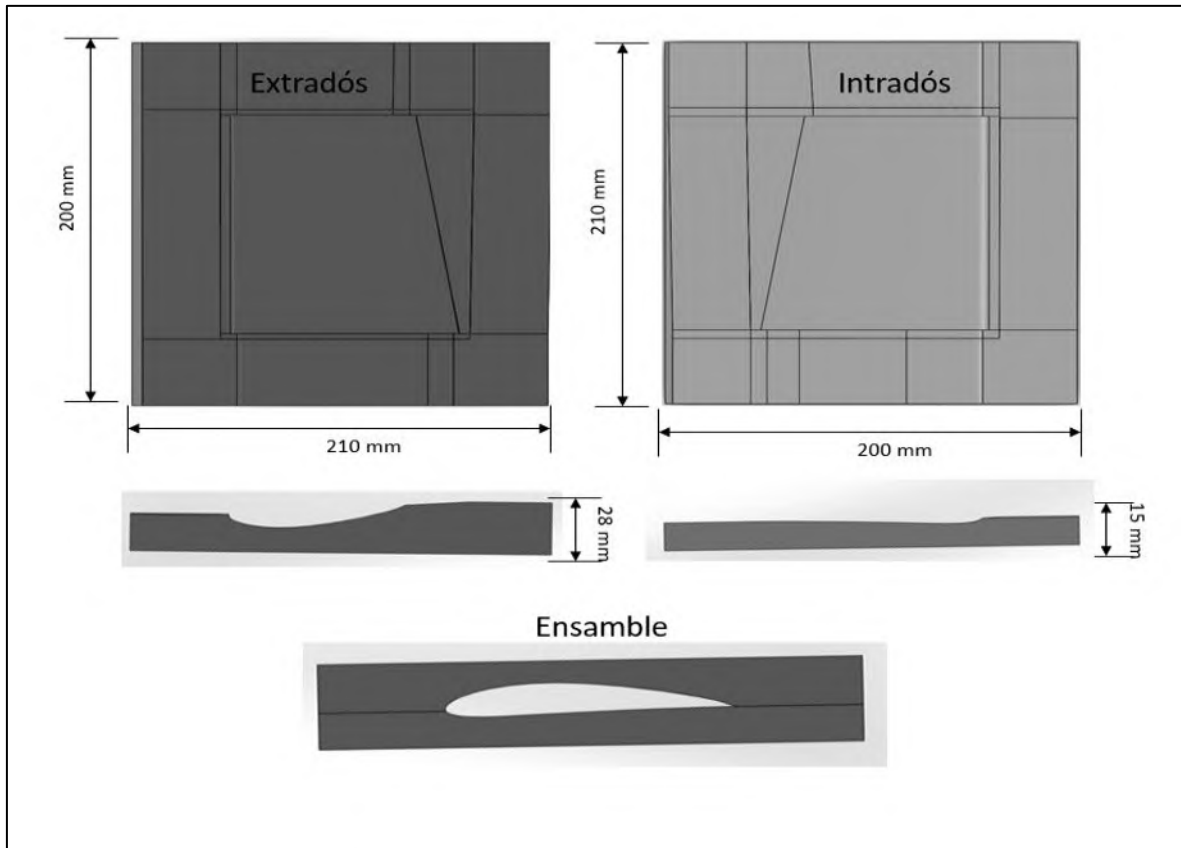


Figura 4.3. Modelado 3D de los moldes del extradós e intradós.



Figura 4.4. Moldes de Nylamid.

La fibra de vidrio y la resina epoxi fue adquirida en Especialidades Plásticas de Aguascalientes, véase figura 4.5.



Figura 4.5. Fibra de vidrio y resina epóxica.

El primer paso es medir el tiempo de trabajo de la resina, como se muestra en la figura 4.6, es el tiempo que se dispone antes de que la resina pase al punto de gel, en este punto la resina adquiere una consistencia de gel que no permite impregnar la fibra, esta diferencia se aprecia en la figura 4.7.

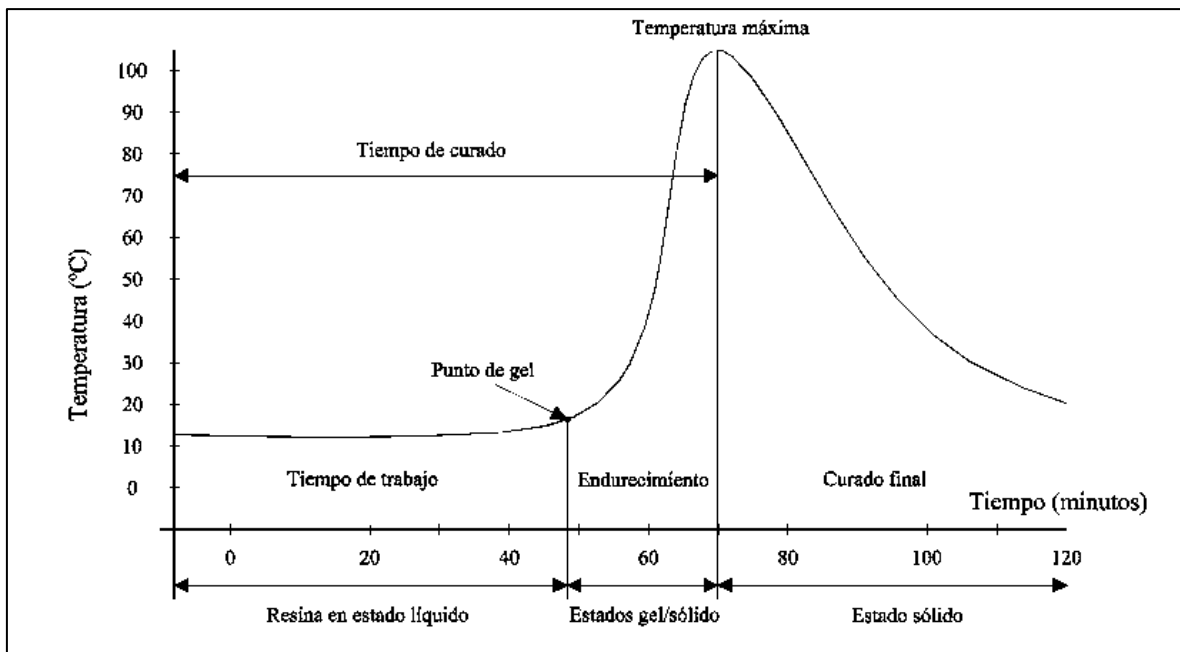


Figura 4.6. Curva exotérmica característica de una resina [74].

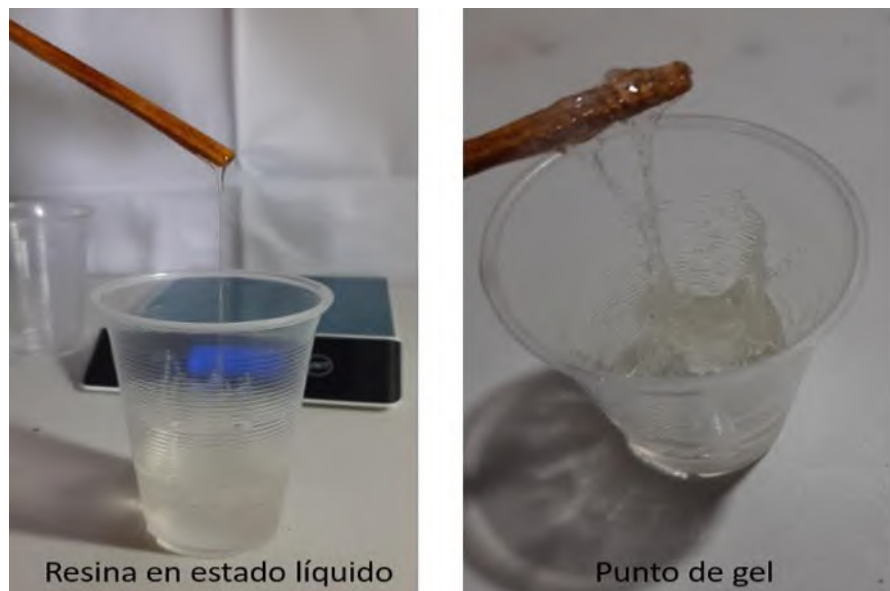


Figura 4.7. Resina en estado líquido y en punto de gel.

En la figura 4.8 se muestra el tiempo que le toma a la resina alcanzar el punto de gel. Con una proporción de 2: 1, es decir, 50 g de resina y 25 g de endurecedor.

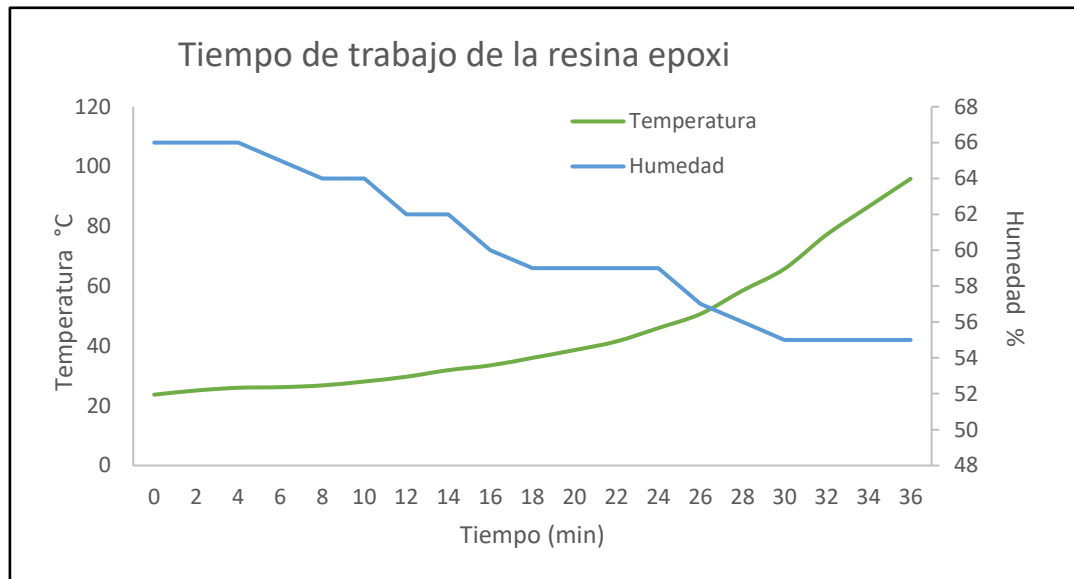


Figura 4.8. Tiempo de trabajo de la resina epoxi.

El acomodo sobre el molde se siguió de acuerdo con la figura 4.2, el primer paso es colocar una capa de cera desmoldante, después se colocan las capas de fibra de vidrio, en este caso se colocaron 3 capas de fibra unidireccional con un espesor de 0.9 mm cada una, dando un espesor total de 2.7 mm, después se coloca la tela desmoldante y encima la malla de flujo, al final se coloca la bolsa de vacío.

La fibra de vidrio se pesa antes de colocarse en el molde, con la finalidad de conocer la resina que será necesaria, se utilizó una proporción de 1 a 2. Véase figura 4.9.



Figura 4.9. Pesaje de la fibra de vidrio unidireccional

En la figura 4.10, se muestra cómo se acomodaron las mangueras de infusión de resina y de succión que están conectadas a una manguera en espiral que ayuda a que el flujo se distribuya como se muestra.

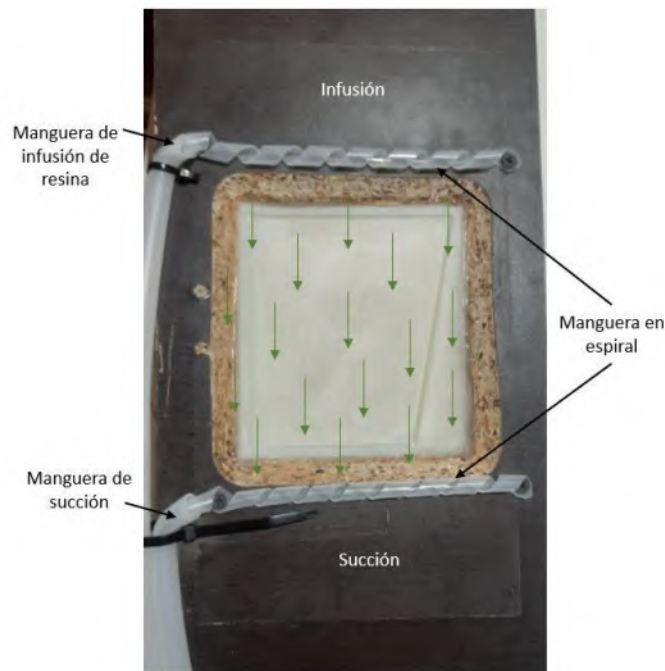


Figura 4.10. Acomodo de las mangueras.

En la figura 4.11, se muestra el proceso del acomodo de las capas sobre el molde, desde la cera desmoldante, las 3 capas de fibra de vidrio, la tela desmoldante y la malla de flujo.

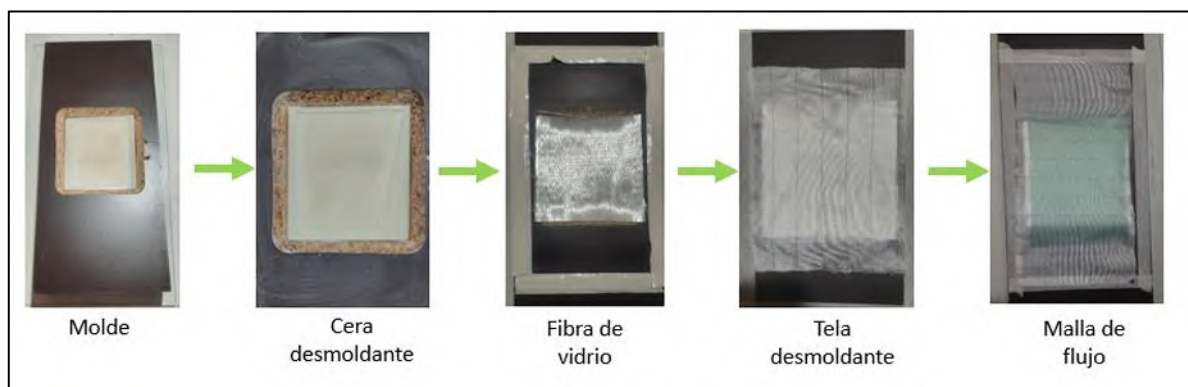


Figura 4.11. Proceso de acomodo de las capas sobre el molde.

En la figura 4.12, se muestran las zonas donde se usó tacky tape para evitar que se mueva la tela desmoldante y la malla de flujo.



Figura 4.12. Zonas de tacky tape.

Finalmente se coloca la bolsa de vacío que es sellada con tacky tape. En la figura 4.13 se muestra al aplicarle vacío y sin vacío. La prueba de vacío es muy importante para garantizar el éxito del proceso.

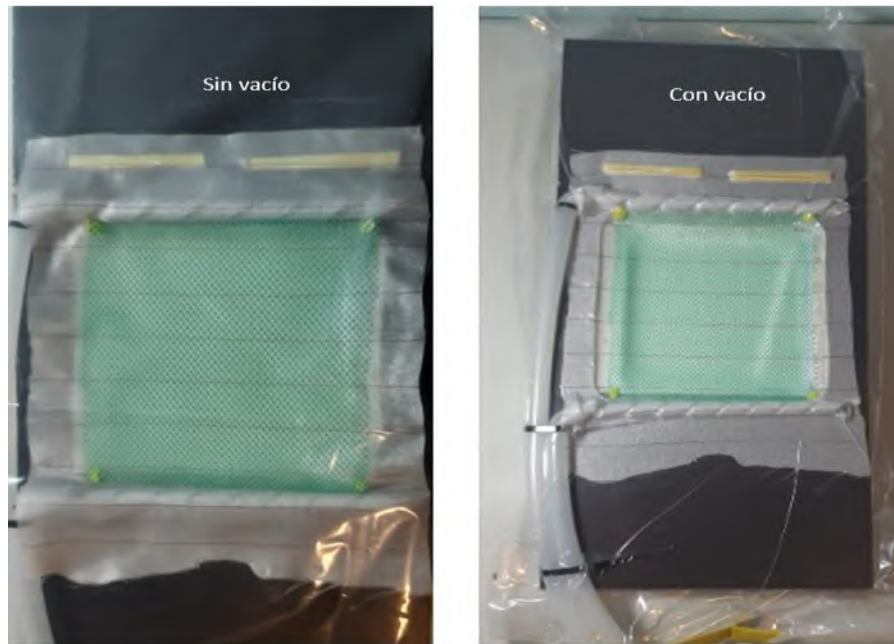


Figura 4.13. Prueba de vacío.

La infusión se realiza en un periodo de tiempo muy corto en 5 segundos alcanza la línea 1 y en 27 segundo la resina a cubierto la totalidad del molde, como se muestra en la figura 4.14.

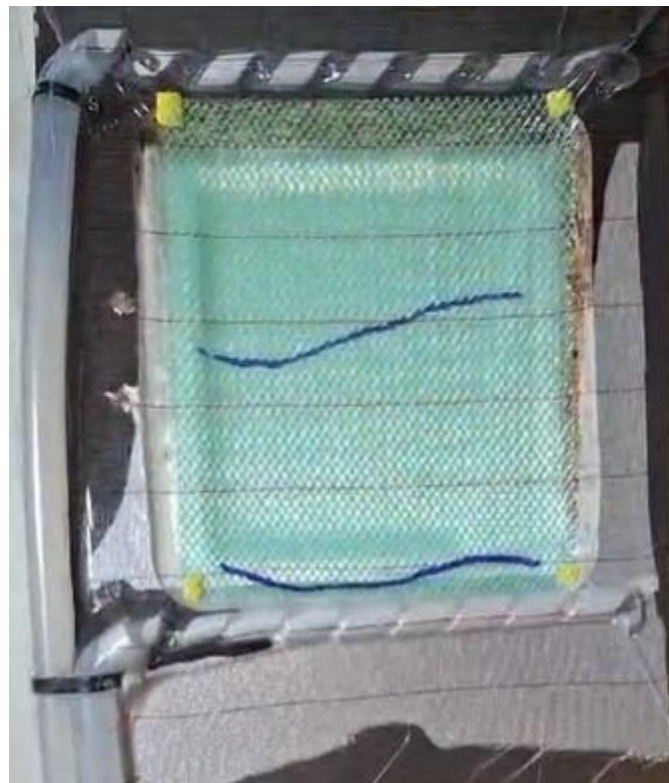


Figura 4.14. Infusión del molde.

Se deja curar la resina sin quitar el vacío por 24 horas antes de desmoldar. La pieza obtenida se muestra en la figura 4.15.



Figura 4.15. Fibra de vidrio infundida.

4.4 Manufactura del álabe por VARTM

En la figura 4.16 se muestra el modelado 3D de los moldes del intradós y extradós de del álabe, se manufacturaron en dos partes debido a la longitud final de 1674.5 mm no es posible maquinarlo en una sola pieza. Los moldes fueron maquinados por Reparaciones Industriales S.A. de C.V. en un centro de maquinado CNC en madera de pino con un espesor de 1 pulgada, véase figura 4.17.

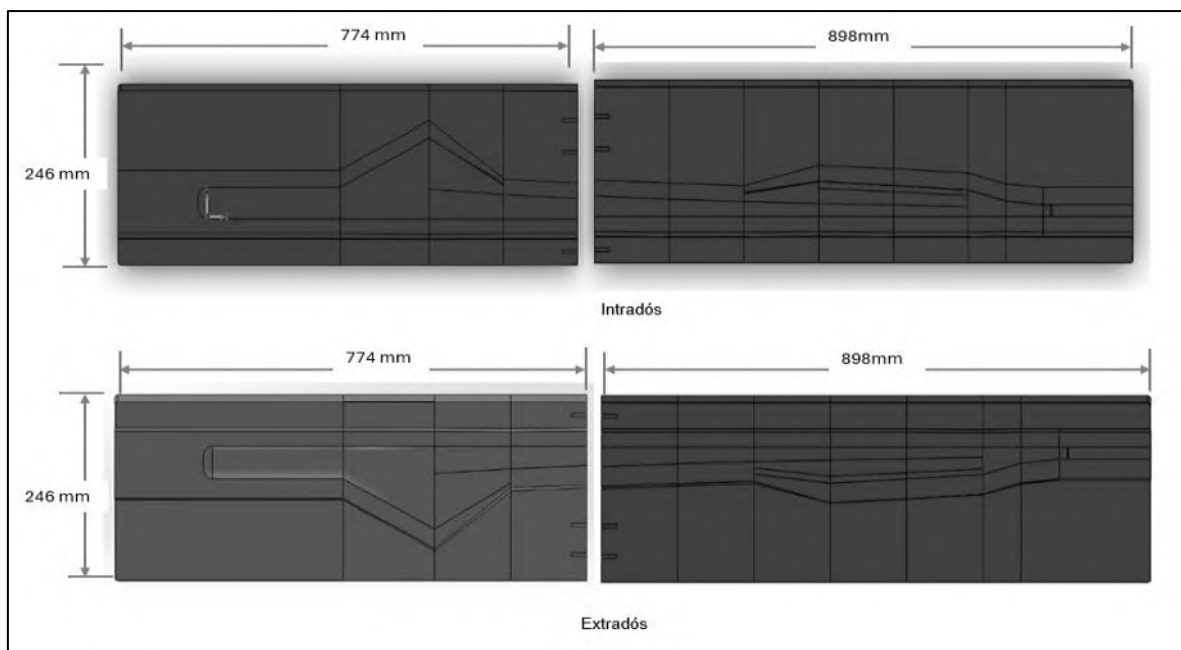


Figura 4.16. Modelado 3D de los moldes del álabe.



Figura 4.17. Manufactura de los moldes en centro de maquinado CNC.

En la figura 4.18 se muestran los moldes terminados del intradós y del extradós.



Figura 4.18. Moldes del álabe.

Antes de comenzar la manufactura, fue necesario realizar pequeñas reparaciones en el molde, ya que la madera tiene irregularidades de forma natural. Se aplicó resanador en la unión de las dos piezas del molde y en las zonas con defectos superficiales. También se aplicaron varias capas de sellador y de primer para mejorar el acabado superficial debido a que la madera que es un material poroso y esto impide que se logre el vacío necesario para el proceso de infusión (véase figura 4.19).

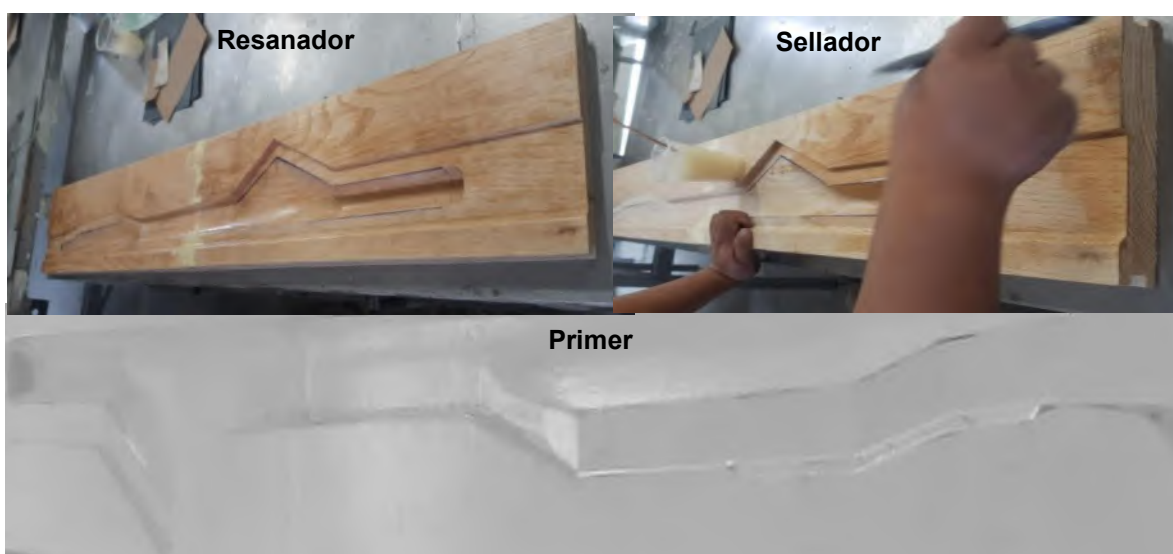


Figura 4.19. Moldes del álabe.

En el anexo C se muestran los materiales empleados, así como sus respectivas fichas técnicas. Se sigue la metodología que se muestra en la figura 4.5. Las fibras de vidrio fueron cortadas y pesadas, utilizando una proporción de 1:1 con la resina. Esta relación considera las pérdidas en las mangueras y las pérdidas en el recipiente de alimentación de resina que no se vacía totalmente para evitar la entrada de aire. En la figura 4.20 se muestra 1084 g de fibra de vidrio, por lo que se prepara la misma cantidad de resina para la infusión.



Figura 4.20. Pesaje de las capas de fibra de vidrio.

Se colocó el tacky tape para delimitar la zona de trabajo, después se aplicaron dos agentes desmoldantes para mejorar el desmoldeo debido a la geometría compleja: primero se aplicaron 3 capas de cera desmoldante y después 1 capa de película desmoldante. Véase figura 4.21.



Figura 4.21. Aplicación de agentes desmoldantes.

En la figura 4.22, se muestra la colocación de las 4 capas de fibra de vidrio, 1 bidireccional y 3 unidireccionales. Con un arreglo de 2 capas unidireccionales, 1 bidireccional y 1 unidireccional, comenzando desde la capa más externa, de acuerdo con el diseño propuesto en el capítulo 2.



Figura 4.22. Colocación de las capas de fibra de vidrio.

En la figura 4.23, se muestra la colocación de la tela desmoldante.



Figura 4.23. Colocación de la tela desmoldante.

En la figura 4.24, se muestra el molde con la malla de fujo y la bolsa de vacío. Se realizó la prueba de vacío donde se alcanzó un vacío de -25 in Hg, el cual es un vacío adecuado para realizar el proceso de infusión de la resina.



Figura 4.24. Prueba de vacío.

La figura 4.25 muestra las fibras ya infusionadas, se aprecia el arreglo de las mangueras de alimentación y de succión. También los puntos A, B y C que fueron puntos de control para medir la temperatura durante la infusión para verificar que no excediera la temperatura de trabajo de la resina. La infusión duró 42 minutos.

Al terminar la infusión, se mantuvo el vacío y el molde se colocó dentro de la cámara de curado, a una temperatura de 80°C por 10 hrs. Durante las primeras 3hrs, se monitoreo la temperatura del molde continuamente para garantizar que no superara la temperatura de 80°C, ya que el curado de la resina es una reacción exotérmica y al sumarle el calor de la cámara de curado la temperatura puede elevarse demasiado y provocar que la resina se queme y degrade. Para controlarlo, se apagó

y prendió, manualmente la cámara de curado durante este tiempo hasta que la resina solidificó y la temperatura se estabilizó.



Figura 4.25. Infusión del molde del álabe

Antes de desmoldar se deja enfriar la pieza hasta que llega a temperatura ambiente, aproximadamente 20 a 24 hrs desde que se inicia la infusión. Después del desmoldeo, las piezas se lavaron con agua y jabón, para ser cortadas de forma manual con una segueta siguiendo el contorno marcado por el molde. En la figura 4.26 se muestra el resultado final de las infusiones.

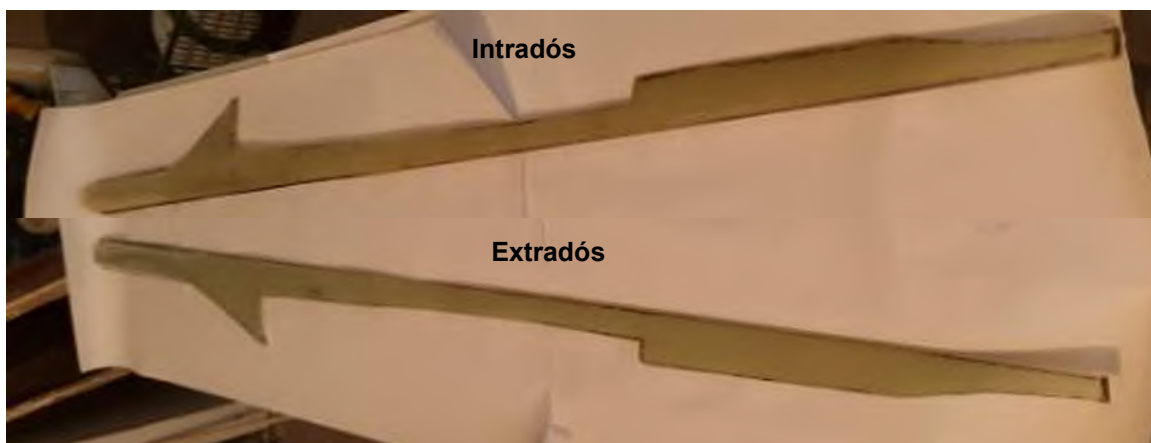


Figura 4.26. Piezas del extradós e intradós recortadas.

Para el larguero se realizó infusión directa sobre una superficie plana de vidrio, no se utilizó molde. Esto permitió obtener una lámina plana, ala que se le dio la forma necesaria mediante el recorte manual con segueta. Se siguió el mismo acomodo de

la figura 4.2, empleándose 2 capas unidireccionales, 1 bidireccional y 1 unidireccional, comenzando desde la capa más externa, de acuerdo con el diseño del capítulo 2. En la figura 4.27, se muestra el larguero antes de infusionar, con el arreglo de las mangueras de alimentación y succión. Así como los puntos de control A y B, en los que se midió constantemente la temperatura para controlar el proceso de curado. Al igual que en los moldes anteriores, el curado duro 10 hrs a una temperatura de 80°C dentro de la cámara de curado. Durante las primeras 3 hrs, se controló manualmente la temperatura para que no excediera el límite y lograr conservar las propiedades mecánicas de la resina.

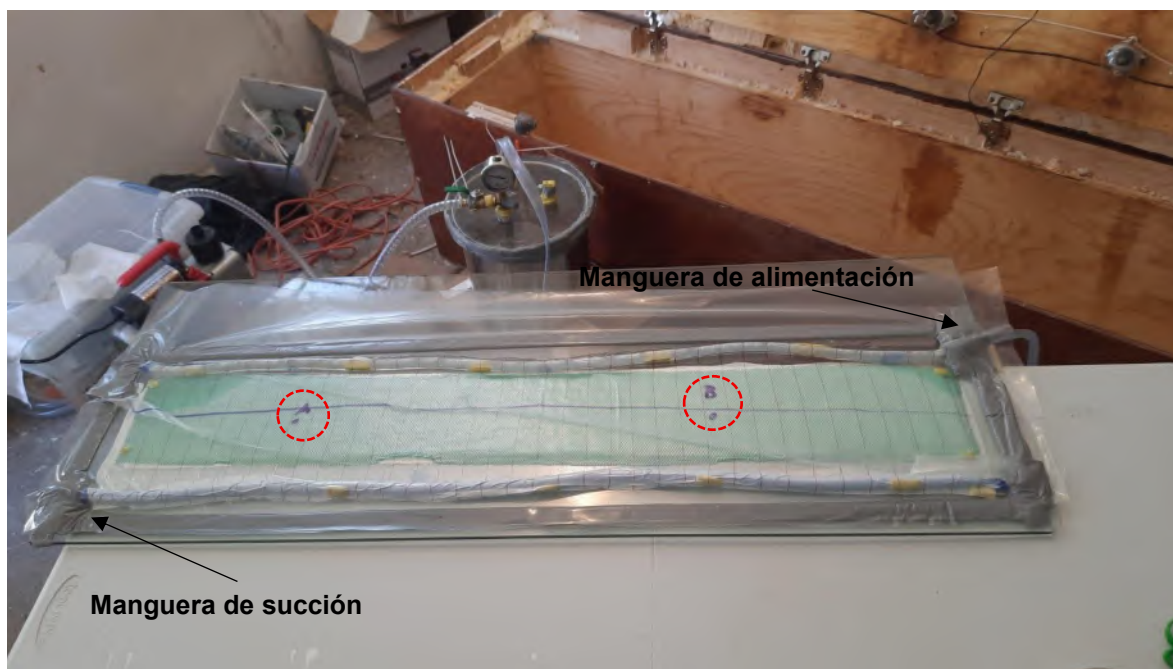


Figura 4.27. Larguero antes de la infusión.

En la figura 4.28, se muestran las líneas marcadas cada 5 minutos para monitorear el avance de la resina en la probeta, esto depende del arreglo de las mangueras, de la geometría de la pieza y del número de capas de fibra. En la figura se muestran el frente de avance de la resina a 5 y 10 minutos. El frente de resina cerro por completo en 28 minutos.

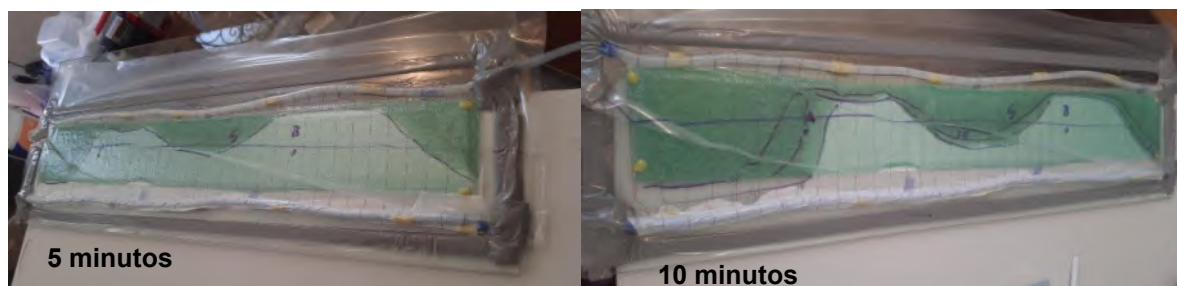


Figura 4.28. Proceso de infusión a 5 y 10 minutos.

En la figura 4.29, se observa la lámina del larguero ya curada y previo a ser marcada y cortada con segueta. En la figura 4.30, se muestran las 3 piezas del álabe: extradós, intradós y el larguero, cortadas y lijadas, listas para el proceso de pegado.



Figura 4.29. Larguero infusionado.

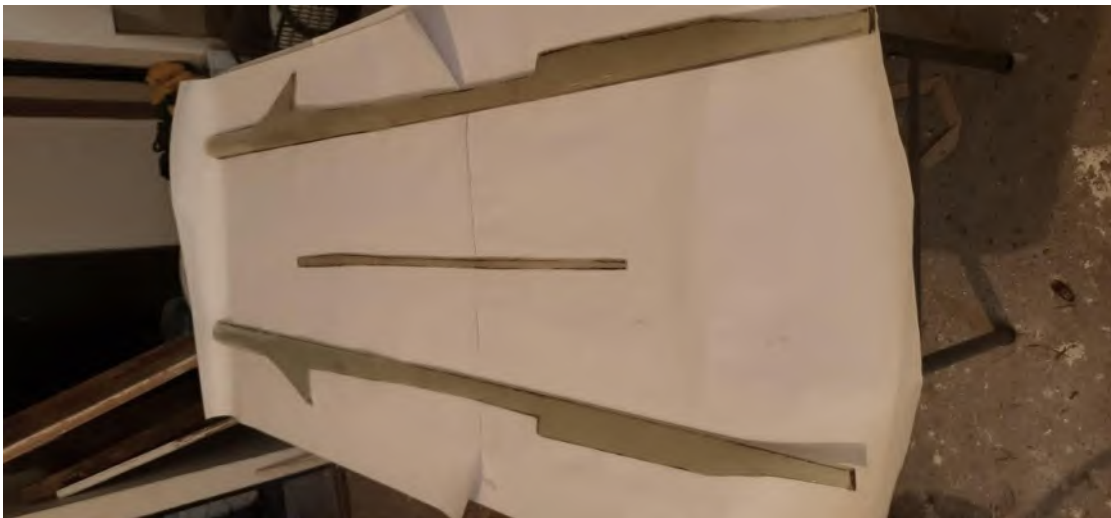


Figura 4.30. Piezas del álabe cortadas: larguero, extradós e intradós.

En la figura 4.31, se muestra la pieza antes de retirar la malla desmoldante y después de retirar la malla desmoldante. Se aprecia el acabado translucido del laminado, lo que indica una buena impregnación de la resina. Sin presencia de fibras secas ni burbujas. Esto refleja la calidad que se obtuvo con este proceso de manufactura.



Figura 4.31. Pieza antes y después de retirar la tela desmoldante.

Finalmente se realiza el proceso de pegado el adhesivo EPIKOTE MGS BP20. Después de la aplicación del adhesivo se realizó un curado en la cámara de curado a 70°C por 7hrs. Véase figura 4.32.

Finalmente se lijo la pieza para retirar los excesos de adhesivo, así como los residuos adheridos en el proceso. En la figura 4.33, se aprecia con mayor detalle el adhesivo, así como algunos residuos (papel blanco) que se adhirieron a la pieza durante la manipulación de la pieza.



Figura 4.32. Pieza terminada.



Figura 4.33. Detalle del adhesivo en la pieza terminada.

Parte II. Manufactura en impresión 3D

4.5. Introducción a la manufactura aditiva

La manufactura aditiva ha tenido un gran desarrollo desde sus inicios. Actualmente existen multitud de procesos de manufactura aditiva que se diferencian principalmente por la forma de crear o depositar la capa, así como, por el tipo de material que se puede emplear en cada caso. Las tecnologías de impresión más conocidas son:

- FDM impresión por deposición de material fundido: hasta 2004, la empresa Stratasys tuvo en exclusiva esta tecnología gracias a haberla patentado. Es una de las tecnologías más utilizadas, en parte, porque es la más barata. La impresora 3D utiliza un filamento termoplástico que se derrite y deposita capa por capa para construir el objeto.
- SLA impresora 3D por Estereolitografía: comúnmente llamada impresora de resina. Fue la primera en utilizarse. Esta tecnología es un poco más complicada que la anterior, el material utilizado es una resina líquida que se endurece cuando se expone a la luz ultravioleta. Por consiguiente, un proyector o láser de dicha luz es utilizado para solidificar la resina necesaria y así construir el objeto.
- SLS impresora 3D de Sinterización Selectiva por Láser: este proceso de fabricación similar a la tecnología SLA, ya que un láser rodea la pieza para ensamblarla sin dejar que se funda. Su uso suele ser industrial ya que el coste de la impresora asociada es elevado.
- DLP Procesamiento digital de la Luz: aunque tiene el mismo funcionamiento que la tecnología anterior, esta tecnología ofrece un mejor acabado en un menor tiempo.
- MSLA estereolitografía enmascarada : es una variante de la tecnología SLA. MSLA utiliza una máscara LED que emite luz ultravioleta a través de una pantalla LCD. Esta pantalla está compuesta de píxeles cuadrados. Considerada una de las tecnologías más rápidas. FDM es la técnica más utilizada de las mencionadas ya que no requiere conocimientos avanzados. Suele recomendarse para particulares que desean familiarizarse con la impresión 3D.

En cuanto a la SLA y la MSLA, ambas proporcionan piezas con mucha precisión, sin embargo, tienen un límite de tamaño y no pueden fabricar productos grandes. Sin embargo, los materiales que utiliza suelen deteriorarse si se encuentran bajo humedad o larga exposición a rayos UV.

En este trabajo se empleó la tecnología FDM, debido a su disponibilidad, facilidad de uso y costo accesible, lo cual la hace adecuada para el desarrollo de prototipos funcionales a escala, como es el caso del álabe con el mecanismo FishBAC.

4.5.1 FFF (Fused Filament Fabrication)

La tecnología de Fused Deposition Modeling (FDM) es una marca registrada por Stratasys Inc., por lo que la comunidad RepRap propuso un término similar para poder hacer referencia a esta tecnología sin ningún tipo de limitación legal: Fabricación con Filamento Fundido, del inglés Fused Filament Fabrication (FFF).

El principio de funcionamiento consiste en la extrusión de un filamento termoplástico a través de una boquilla caliente, la cual deposita el material fundido capa por capa hasta formar la geometría deseada. Las principales ventajas de la impresión 3D por FFF son:

- Amplia variedad de materiales: este método permite la utilización de una amplia gama de materiales termoplásticos, cada uno con propiedades específicas. Desde PLA que es sencillo de usar, ecológico y con gran variedad de acabados hasta el ABS que permite crear piezas con una mayor resistencia mecánica.
- Estructuras de soporte integradas: permite la creación de estructuras de soporte integradas directamente en el modelo durante la impresión. Esto facilita en gran medida la producción de objetos con formas complejas.
- Reducción de tiempos: la impresión es rápida y asequible, lo que la hace ideal para la creación de prototipos y la producción en serie corta.
- Bajo coste de producción y de maquinaria: a diferencia de otras tecnologías de manufacturación, la impresión 3D tiene un menor coste de fabricación inicial.
- Alta personalización: permite adaptar el diseño de las piezas a requerimientos específicos de geometría, ajuste o función sin necesidad de cambiar herramientas o moldes, lo cual es especialmente útil en la fabricación de prototipos únicos o componentes personalizados.

Aunque la impresión 3D por FFF ofrece numerosas ventajas respecto a otras técnicas de fabricación tradicional presenta limitaciones en la resolución superficial, ya que los objetos pueden presentar cierta rugosidad superficial, lo que puede requerir procesos de post-procesado para obtener un acabado más suave.

Otro aspecto para tener en cuenta es el tamaño de construcción limitado, las dimensiones de la impresión están restringidas por el tamaño de la plataforma de construcción, por lo que para la impresión de objetos de gran tamaño deben seguirse pasos extras como la segmentación, además de añadir sistemas de ensamble y soportes.

La calidad de impresión depende de diversos factores como el tipo de material, el diámetro del filamento, la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y la resolución capa a capa. Si bien presenta limitaciones en cuanto a resistencia mecánica o precisión en comparación con tecnologías como SLA o SLS, para

aplicaciones como el prototipado de componentes mecánicos a escala, FFF es una solución práctica y eficiente.

4.5.2 Parámetros de impresión 3D

La impresión FFF es una de las tecnologías más versátiles debido a su gran cantidad de parámetros modificables, cada uno de ellos influye en mayor o menor medida en el comportamiento mecánico del elemento impreso y determinarán la resistencia, las tolerancias, el acabado superficial, la densidad y la masa total de la pieza.

- **Velocidad de impresión:** es la velocidad a la que se mueve el cabezal de extrusión mientras deposita el filamento fundido en la cama de impresión. Este parámetro es muy importante, ya que está directamente relacionado con el tiempo total de impresión. Además, dependiendo de si dicha velocidad es demasiado alta o baja, puede producir vibraciones en la máquina que afectarán a las dimensiones y acabados finales de la pieza, o permitir un mayor tiempo de enfriamiento a la última capa impresa antes de que se deposite sobre ella la capa consecutiva, esto afecta la adhesión entre capas y por ende la resistencia mecánica de la pieza.
- **Porcentaje, patrón y ángulo de relleno:** los más comunes son el patrón rectilíneo, el de rejilla (45° , -45°) y el de panel de abeja. El ángulo de relleno tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico del elemento impreso, ya que, dependiendo de cómo vaya a trabajar dicho elemento, se requerirá que las fibras estén orientadas de una u otra forma. Estos parámetros influyen en el peso, costo y resistencia final de la pieza.
- **Altura de capa:** es uno de los parámetros más importantes, ya que influye directamente en el acabado superficial en el eje Z, también influye en la adhesión entre las distintas capas y en el tiempo de impresión. Los fabricantes recomiendan valores para este parámetro entre 0.1 mm y no superiores al 80 % del mismo.
- **Temperatura de impresión:** este parámetro está muy relacionado con la velocidad de flujo, debido que a un aumento de dicho parámetro implica una mayor temperatura de impresión. Este parámetro se configura de acuerdo con el material empleado y se deben evitar los extremos, ya que una temperatura de impresión demasiado baja hará que el polímero no fluya correctamente, produciendo obstrucciones innecesarias en el extrusor; una temperatura demasiado alta, puede provocar que el filamento se degrade y pierda propiedades estructurales. Aunque cada fabricante facilita un rango de temperaturas para obtener impresiones óptimas, este parámetro se deberá ajustar para cada impresión y para cada material.
- **Distancia inicial entre nozzle y cama de impresión:** si el nozzle se encuentra muy alejado, las capas iniciales no se adherirán bien a la cama y se obtendrán

separaciones. Si por el contrario está muy cerca de la cama de impresión, se producen obstrucciones de material y surcos en las capas iniciales.

4.5.3 Materiales para impresión 3D

Existe una gran gama de materiales para impresión 3D por FDM. Los más comunes son los plásticos que se encuentran en una gran variedad de colores, incluyendo opciones transparentes y fluorescentes. Los materiales más comunes son el ABS, el PLA y sus diversas mezclas.

Las impresoras FDM más avanzadas también pueden imprimir con otros materiales especializados que ofrecen propiedades mejoradas como: la resistencia al calor, resistencia a impactos, resistencia química y rigidez. En la tabla 4.3 se muestran los materiales más usados con sus características y aplicaciones.

Tabla 4.3 Materiales más usados en la impresión 3D por FDM.

Material	Características	Aplicaciones
ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)	• Tenaz • Duradero • Resistente a impactos • Resistente al calor • Necesita una plataforma caliente para imprimirse • Necesita ventilación	Prototipos funcionales
PLA (ácido poliláctico)	• Fácil de imprimir • Rígido y fuerte pero frágiles • Menos resistentes al calor y a los productos químicos • Biodegradables • Inodoros	Modelos conceptuales Prototipos estéticos
PETG (tereftalato de polietileno glicolizado)	• Compatible con temperaturas de impresión más bajas para una producción más rápida • Resistente a la humedad y a los productos químicos • Alta transparencia • Puede ser apto para la industria alimenticia	Aplicaciones impermeables Componentes de fijación mediante presilla
Nylon	• Resistente, duradero y ligero • Duro y parcialmente flexible • Resistente al calor y a los impactos • Muy difícil de imprimir con el FDM	Prototipos funcionales Piezas resistentes al desgaste
TPU (Poliuretano termoplástico)	• Flexible y estirable • Resistente a impactos • Excelente amortiguación de vibraciones	Prototipos flexibles
PVA (alcohol polivinílico)	• Material de soporte soluble • Se disuelve en el agua	Material para soportes
HIPS (poliestireno de alto impacto)	• Material de soporte soluble que se usa a menudo con ABS • Se disuelve en limoneno químico	Material para soportes
Materiales compuestos (fibra de carbono, kevlar, fibra de vidrio)	• Rígidos, fuertes o extremadamente resistentes • Compatibilidad limitada a algunas impresoras 3D FDM industriales costosas • Costo elevado	Prototipos funcionales Guías, fijaciones y herramientas

4.6 Prototipado del FishBAC

Para la fabricación del prototipo del dispositivo FishBAC se seleccionó el material TPU (poliuretano termoplástico), principalmente por su flexibilidad, necesaria para para lograr el movimiento controlado de la geometría flexible que requiere el mecanismo. Además, el TPU ofrece una buena resistencia mecánica, durabilidad ante esfuerzos cíclicos y adecuada adherencia entre capas, por lo que es ideal para aplicaciones con deformaciones repetitivas.

La impresión del componente se realizó utilizando una impresora Creality Ender-3 V3, con el software Ultimaker Cura. En la figura 4.34 se presentan los parámetros de impresión utilizados.

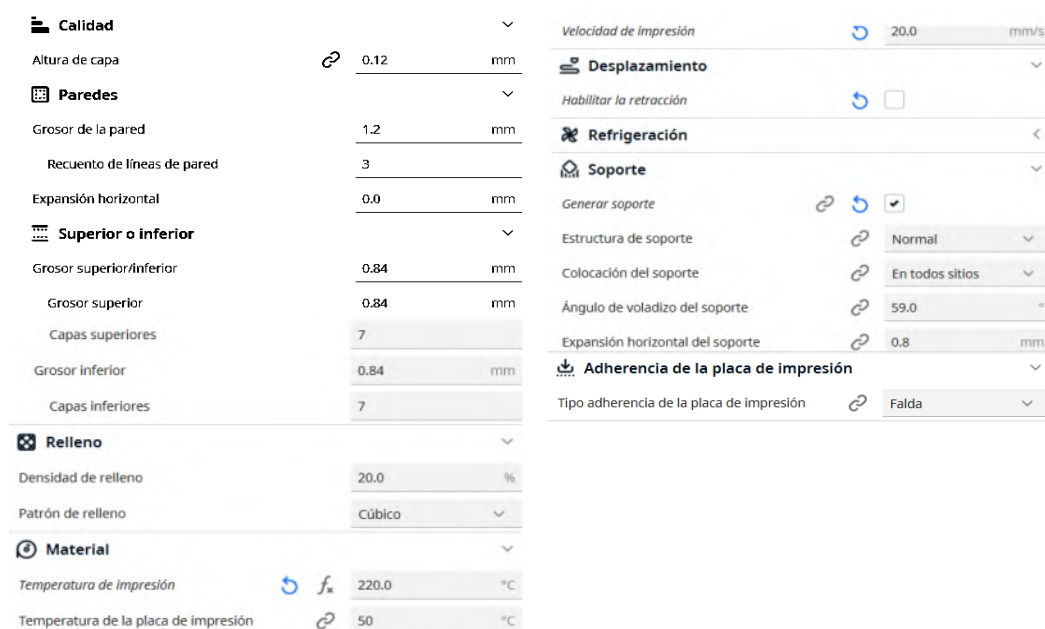


Figura 4.34. Parámetros de impresión 3D.

En la figura 4.35 se presentan algunos de los prototipos propuestos para el mecanismo FishBAC. Se propusieron diversas geometrías con el objetivo de lograr una adecuada flexibilidad. Algunos prototipos presentaron limitaciones como excesiva rigidez, baja resolución en el detalle de la impresión o flexión no uniforme. En la figura 4.36 se muestra el prototipo final seleccionado, el cual presentó el mejor comportamiento en cuanto a flexión, suavidad de movimiento y recuperación.

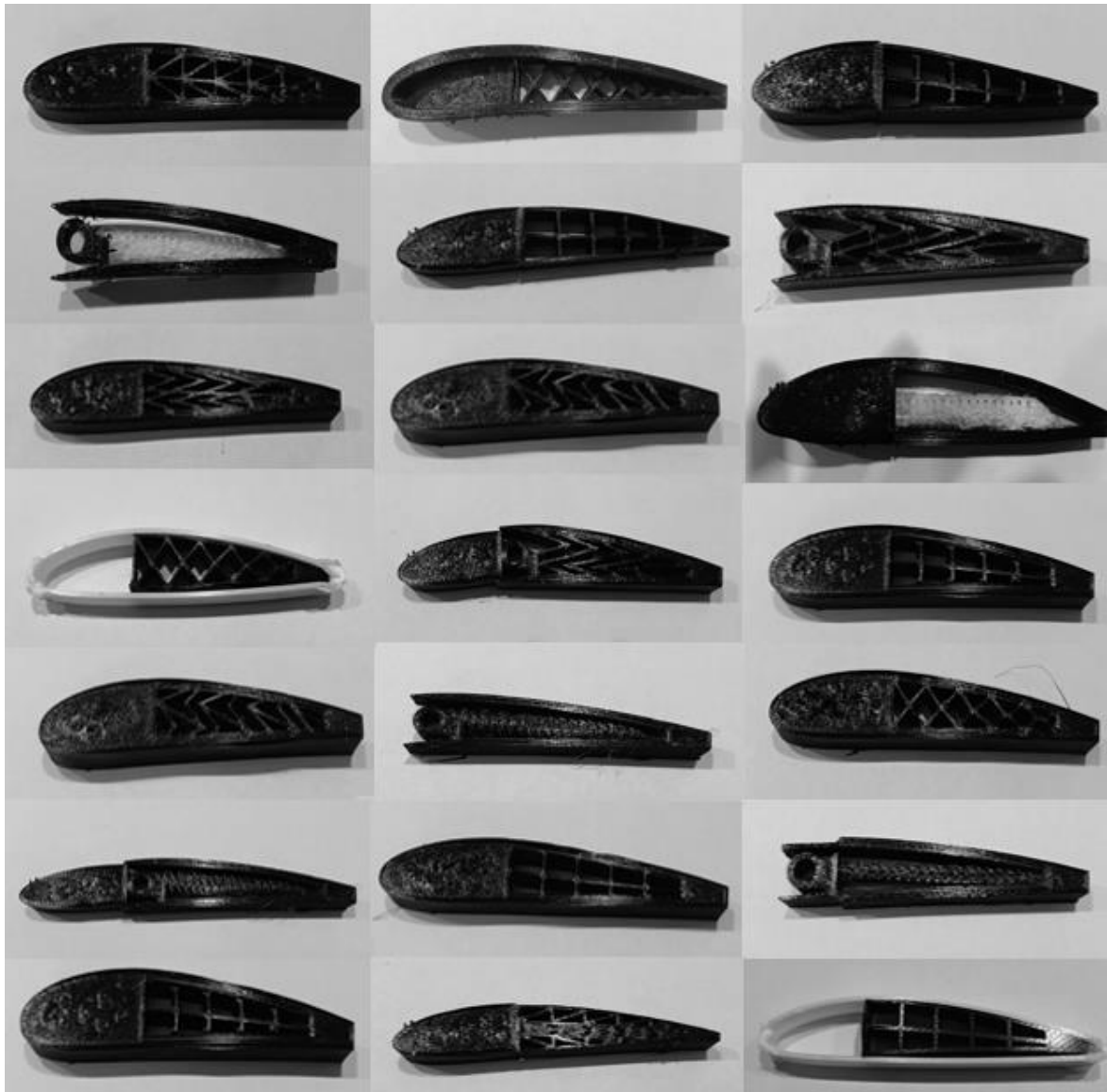


Figura 4.35. Prototipos propuestos para el mecanismo FishBAC.



Figura 4.36. Prototipo seleccionado para el mecanismo FishBAC.

Se imprimió la sección completa del mecanismo FishBAC en 3D, con una longitud de 0.635 m, en un tiempo total de impresión de 77 hrs. Véase figura 4.37.



Figura 4.37. Impresión 3D del FishBAC.

El ensamble se realizó de forma manual. El hilo de fibra de carbono que va dentro del núcleo se colocó con aguja, y se utilizó adhesivo epóxico 3M DP125 para fijar la parte impresa a estructura de fibra de vidrio y resina epoxi. Previamente se lijaron ambas superficies con una lija de grano fino para mejorar la adhesión. Una vez unido se dejó curar a temperatura ambiente por 24 hrs. En la figura 4.38, se muestra el resultado del álabe con el mecanismo FishBAC. En rojo se aprecia tenuemente la unión, ya que, debido a las dimensiones se imprimió en 2 partes.

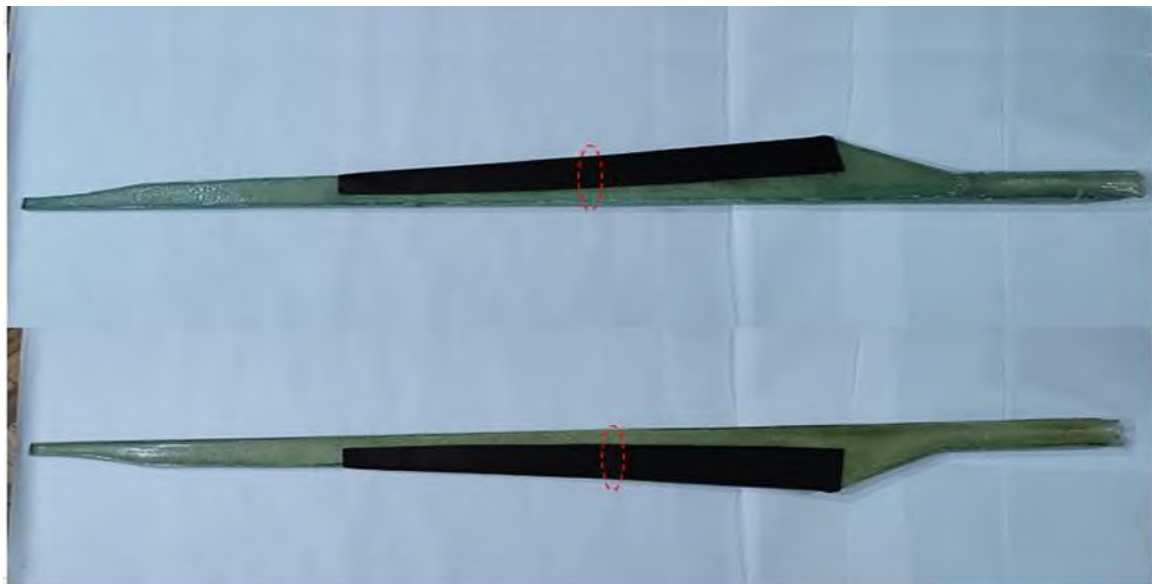


Figura 4.38. Álabe con mecanismo FishBAC.

Se realizaron pruebas funcionales con el objetivo de evaluar el comportamiento del mecanismo ensamblado. Se accionó el actuador del mecanismo y se verificó el movimiento del mecanismo FishBAC. La deformación deseada se generó de manera adecuada.

La figura 4.39 muestra el mecanismo en reposo (3°) y a 7° . Debido a que el desplazamiento angular es reducido, visualmente es difícil de detectar; por lo que, se colocó una cinta roja en el borde para mejorar la visibilidad. El comportamiento del sistema validó la funcionalidad del ensamblaje, así como el movimiento esperado del mecanismo.

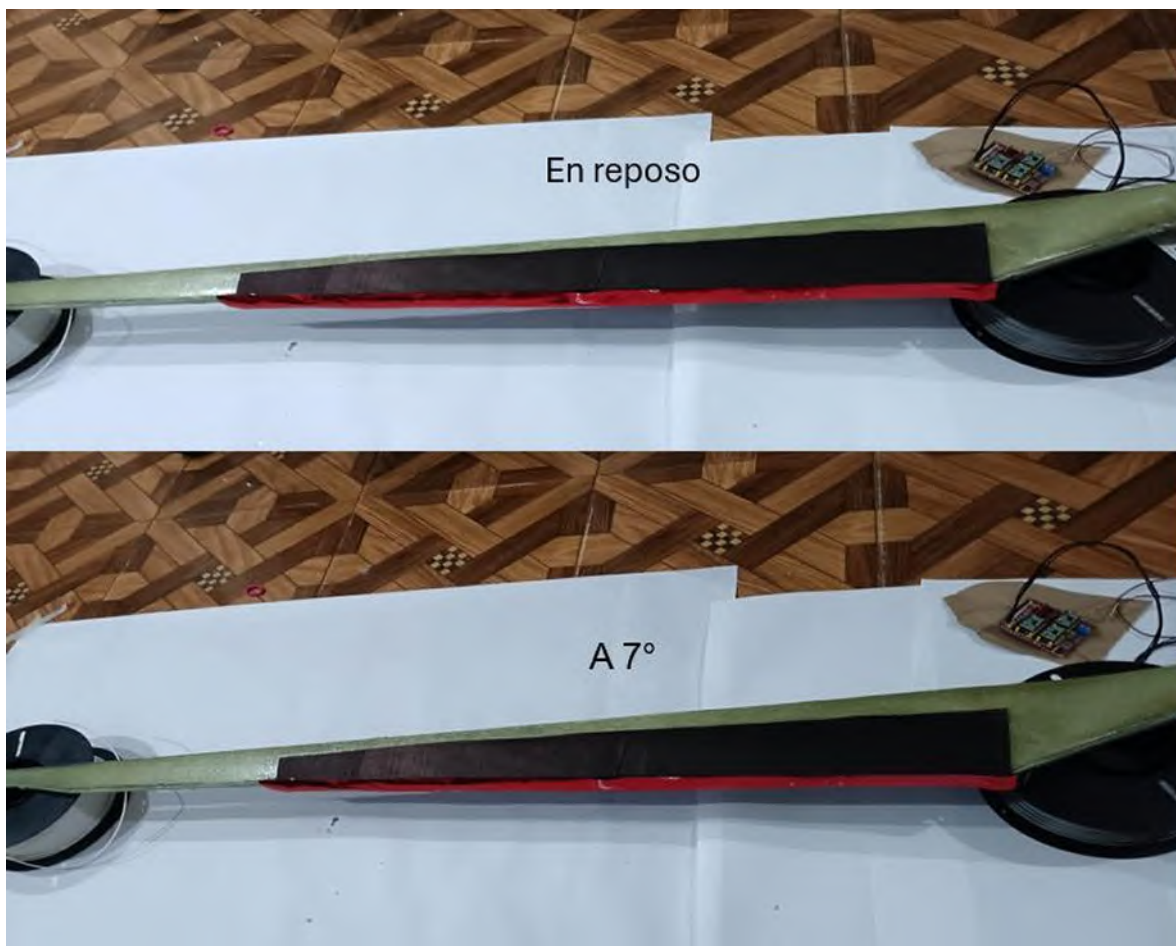


Figura 4.39. FishBAC. En reposo y a 7° .

Capítulo 5. Pruebas estáticas

5.1 Galgas extensométricas

Después de seleccionar el punto en donde se colocará la galga extensiométrica, se deben seguir los siguientes pasos para su instalación. Véase figura 5.1.

Preparación de la superficie: antes de fijar una galga a la superficie de la pieza o estructura en que se desea medir la deformación, la superficie debe cumplir ciertos requerimientos para asegurar la correcta unión, debe estar libre de incrustaciones, óxido, pintura y además debe estar lisa y compacta [57, 58].

La superficie del álabe se debe desengrasar con gasas estériles y lijar en el mismo sentido pasando de una lija de grano grueso a una de grano fino paulatinamente; además de eliminar cualquier residuo mediante la aplicación de acondicionador y neutralizador a la superficie.

Transporte de la galga: se debe limpiar todo el material que ese en contacto con la galga utilizando neutralizador; tales como pinzas y la superficie utilizada para su transporte. Se debe tener especial cuidado de no tocar la rejilla con las pinzas durante el transporte de la galga. Se coloca la galga en la cinta de transporte.

Marcado de la superficie: utilizando un lápiz se marca la superficie del álabe con el fin de ayudarnos a posicionar la galga correctamente. La superficie del álabe se limpia con acondicionador y neutralizador utilizando gasas estériles.

Pegado de la galga: se posiciona la galga sobre la línea previamente marcada, con ayuda de las flechas de centrado de la galga. Se levanta un extremo de la cinta empleando un ángulo de 35° y se aplica catalizador sobre la galga. Se coloca adhesivo sobre la superficie del álabe y se posiciona la galga. Se aplica presión con el dedo sobre la galga por alrededor de 1 minuto. Se retira la cinta y se verifica que la galga quede perfectamente adherida.

Soldado de la galga: se preparan los cables y se fijan sobre las terminales de la galga con ayuda de cinta. Se soldán los cables a la galga. La soldadura debe quedar como un pequeño montículo sobre la terminal y la punta del cable. Debe tener un aspecto suave y brillante y deben evitarse picos y soldaduras opacas. Se coloca cinta adhesiva sobre los cables.

Finalmente se coloca una capa de barniz de recubrimiento para proteger la galga ya instalada de agentes externos como grasas, polvo, humedad, etc. [57, 58].

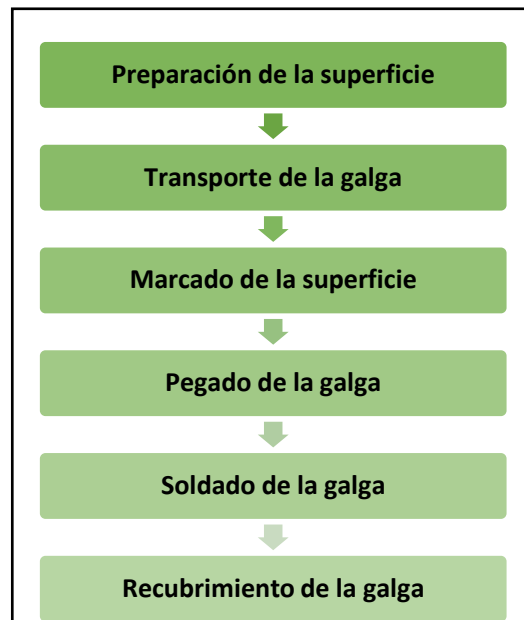


Figura 5.1. Metodología para instalación de galgas extensométricas.

5.2 Instrumentación del álabe

Se seleccionaron las galgas CEA-06-24UZA-120 de Vishay Micro-Measurements, estas son adecuadas para el uso en materiales compuestos y miden deformaciones unidireccionales. Su factor de galga es de 1.5 y su resistencia es de $120\ \Omega$, que es compatible con el equipo de medición. Su uso se recomienda en un rango de temperatura de $-75\ ^\circ\text{C}$ y $+175\ ^\circ\text{C}$, tolerancia $\pm 3\%$. En la figura 5.2, se muestran las galgas empleadas.



Figura 5.2. Galgas extensométricas CEA-06-24UZA-120.

5.2.1 Instalación de las galgas extensométricas

Preparación de la superficie:

Previamente a la instalación de la galga, se lija la superficie con una lija de grano fino. Después se aplica neutralizador y acondicionador, en ese orden, con una gasa a la superficie, con la finalidad de que esta se encuentre libre de contaminantes que impidan la adherencia de la galga a la superficie. Véase figura 5.3



Figura 5.3. Preparación de la superficie.

Se traza una línea con un lápiz para usar como guía de donde se posicionará la galga y después se aplica de nuevo el neutralizador y acondicionador, quedando una marca casi imperceptible. Véase figura 5.4.



Figura 5.4. Marcado de la superficie.

La galga se coloca en una superficie limpia, en este caso nos apoyamos de un vidrio previamente neutralizado y acondicionado. Con ayuda de cinta Diurex se posiciona sobre la línea guía, como se muestra en la figura 5.5.

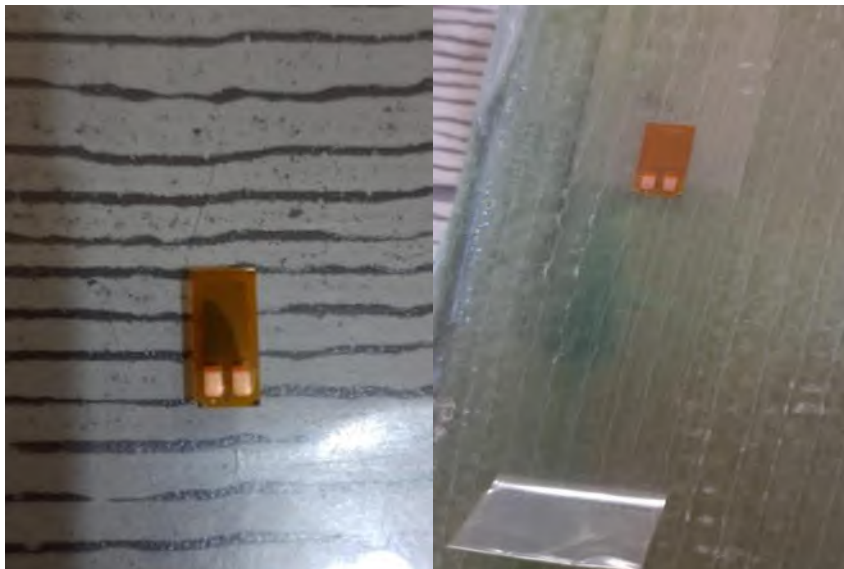


Figura 5.5. Transporte de la galga.

Se levanta la cinta para aplicar catalizador sobre la galga y también aplicar adhesivo en la superficie del álabe. Después se vuelve a posicionar la galga con la cinta y se presiona con el pulgar por un minuto para garantizar la adhesión, posteriormente se retira la cinta cuidadosamente, dejando la galga fija a la superficie. Véase figura 5.6.



Figura 5.6. Pegado de la galga.

Se utiliza cinta para cubrir la galga y protegerla durante el proceso de soldado. Después se sueldan los cables a las terminales de las galgas, cuidando de no dejar soldaduras puntiagudas o que se junten los puntos. Se aplica removedor para retirar la cinta que protege la galga sin dañarla o despegarla. Véase figura 5.7.

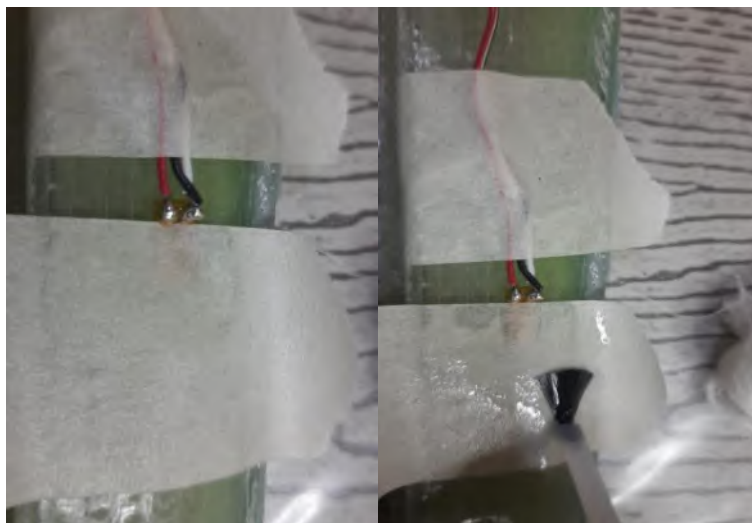


Figura 5.7. Pegado de la galga.

Por último, se aplica una capa de recubrimiento sobre la galga para protegerla. Véase figura 5.8.

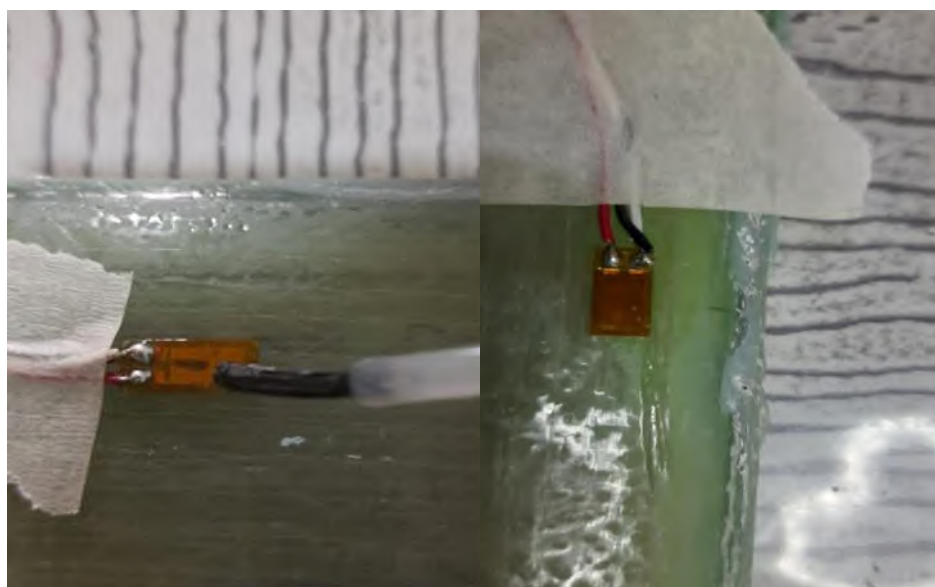


Figura 5.8. Recubrimiento de la galga.

Se colocaron 3 galgas extensométricas (A, B y C) en el extradós del álabe: próxima a la punta, en la zona media y en la zona de la raíz, tal como se muestra en la figura 5.9. La carga se coloca entre las galgas B y C , a 1/3 desde la punta del álabe.

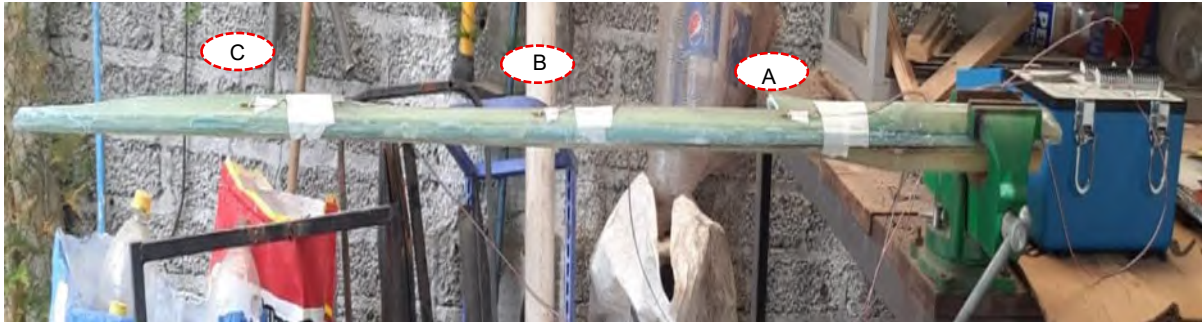


Figura 5.9. Ubicación de las galgas en el álabe.

5.2.2 Equipo de medición

El equipo utilizado para registrar las microdeformaciones es el Indicador de tensión y registrador modelo P3 de Vishay Micro-Measurements, este cuenta con 4 canales que se pueden configurar como cuarto de puente, medio puente o puente completo. Véase figura 5.10.



Figura 5.10. Indicador de tensión y registrador modelo P3.

5.3 Pruebas estáticas

Se realizaron pruebas estáticas para dos casos de carga: Lead-lag y Flapwise. Las cargas se colocaron a $1/3$ de la longitud total medida desde la punta del álabe. Las cargas se calcularon previamente en el capítulo 3, en la tabla 3.7. Las galgas A, B y C se conectaron en cuarto de puente, usando los canales 1, 2 y 3 del indicador de tensión P3, respectivamente. Véase figura 5.11.

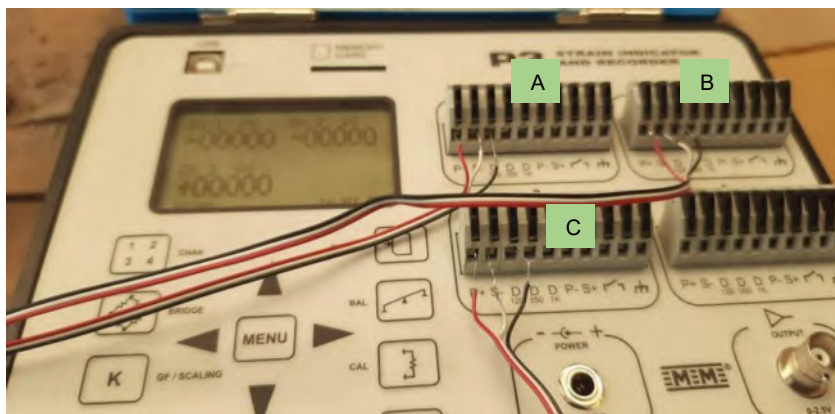


Figura 5.11. Conexión de las galgas A,B y C.

Antes de comenzar las pruebas, se calibró el equipo para que todos los canales marquen cero, después se colocaron las cargas como se muestra en la figura 5.12. Se registro la lectura de la medición y se retiró la carga. Se espera el tiempo necesario para que el álabe se restituya a su posición original y se vuelve a colocar la carga para repetir el proceso.



Figura 5.12. Colocación de cargas para Flapwise.

5.4 Resultados de las pruebas estáticas

Para el caso de Lead-lag se realizaron 50 pruebas, mientras que para el caso de Flapwise se realizaron 20 lecturas. En la figura 5.13 se muestran los resultados de las mediciones para el caso de Lead-lag.

Las menores microdeformaciones se dieron en la punta, con valores tanto positivos como negativos, lo que indica que se encuentra a tensión y compresión de forma alternada. En la zona media se obtuvieron valores intermedios y en la zona de la raíz es donde se dieron los valores más altos, esto es congruente con el comportamiento esperado, ya que en la zona de la raíz es donde se presentan los mayores esfuerzos.

En la figura 5.14 se muestran los resultados de las mediciones para el caso de Flapwise. Las menores microdeformaciones se dieron en la punta, en la zona media se obtuvieron valores intermedios y en la zona de la raíz es donde se dieron los valores más altos. Este comportamiento es el mismo que en el caso de carga Lead-lag y es congruente con el comportamiento esperado. La estadística detallada de las mediciones se muestra en el anexo D.

Figura 5.13. Microdeformaciones para Lead-lag.

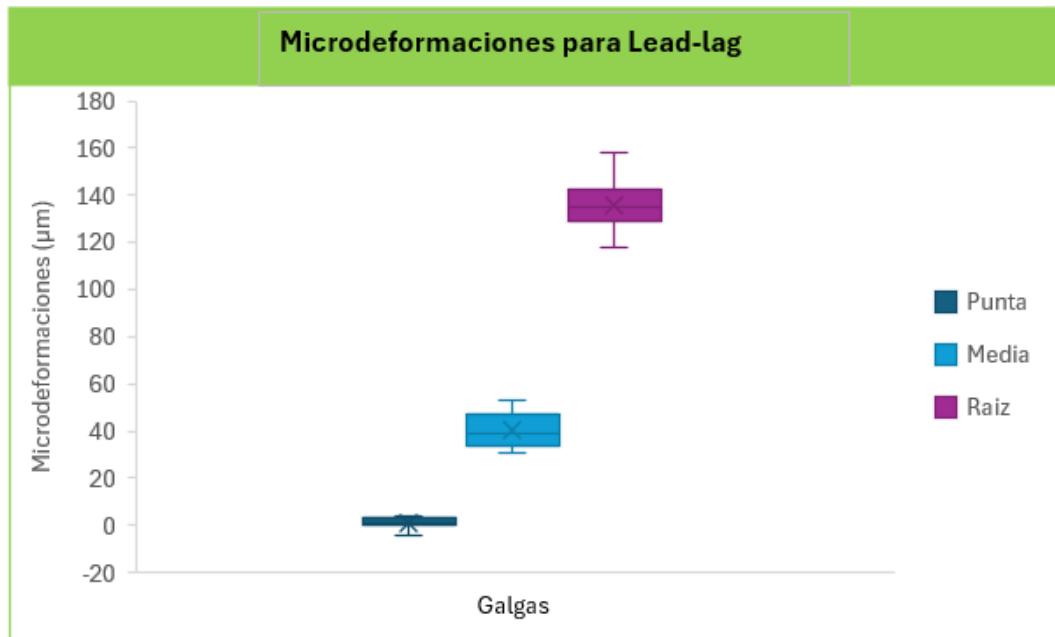
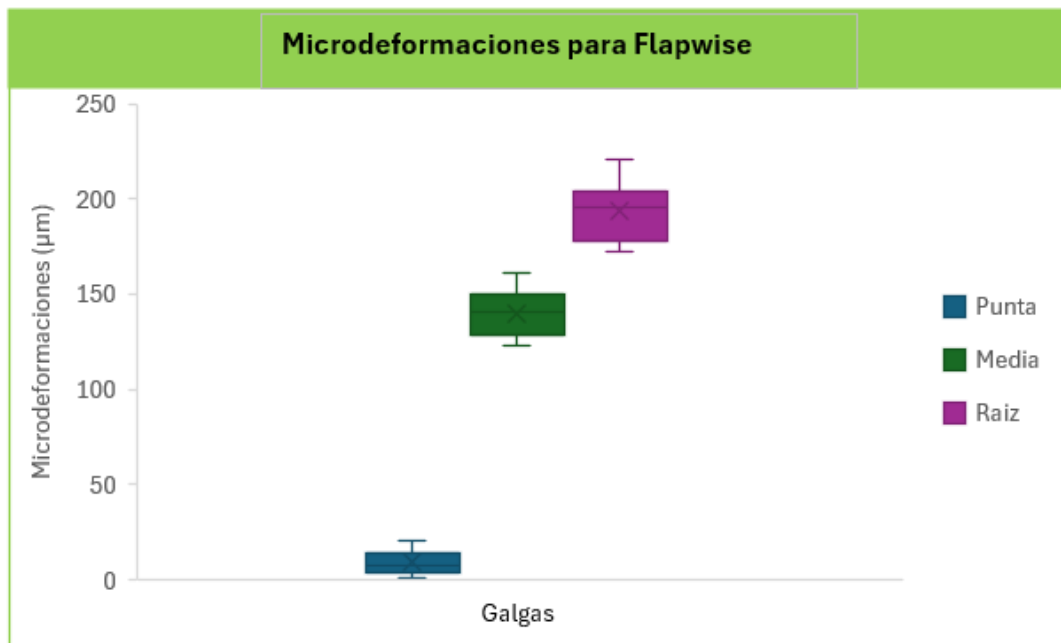


Figura 5.14. Microdeformaciones para Flapwise.



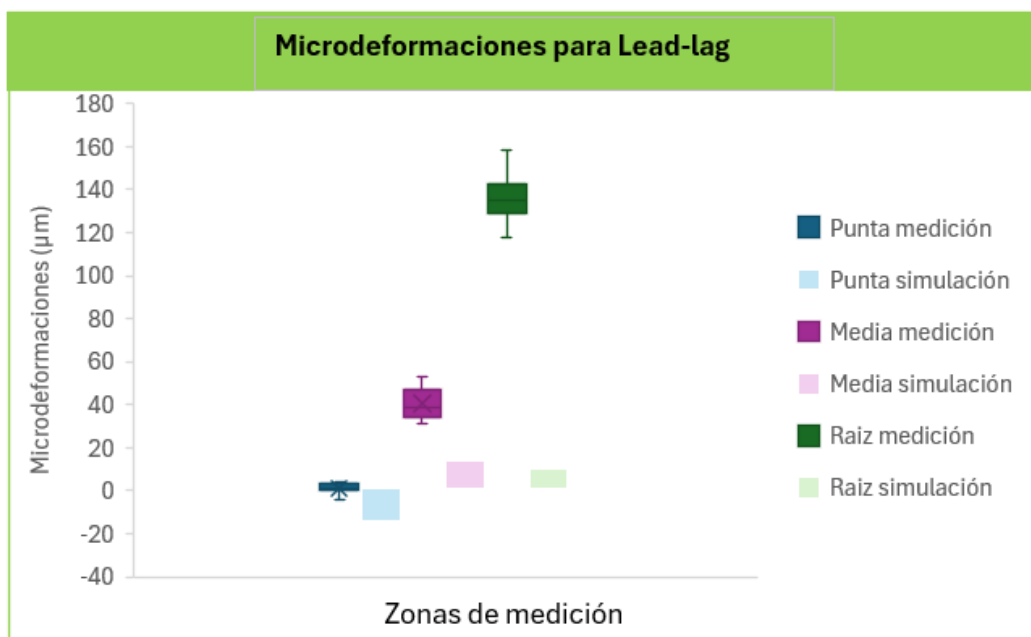
5.5 Resultados experimentales vs simulación numérica

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos de la simulación numérica, en el capítulo 4 y los resultados que fueron obtenidos de forma experimental. En la figura 5.15 se muestra la comparación para Lead-lag. Se observa que los valores de simulación son menores que los obtenidos de forma experimental para todas las zonas. Las mediciones superan a los valores simulados hasta en 159 μm .

En zona de la punta los resultados experimentales y de simulación se encuentran muy próximos. En la sección media los valores obtenidos mediante experimentación son mayores que los de la simulación y en la sección de la raíz es donde se encuentra la mayor diferencia entre los resultados.

En la zona de la punta los valores obtenidos tanto de forma experimental como en la simulación tienen valores positivos y negativos, indicando que se encuentra alternativamente a tensión y compresión. En las otras zonas los valores son positivos para simulación y experimentación, por lo que se encuentran esfuerzos de tensión en estas zonas.

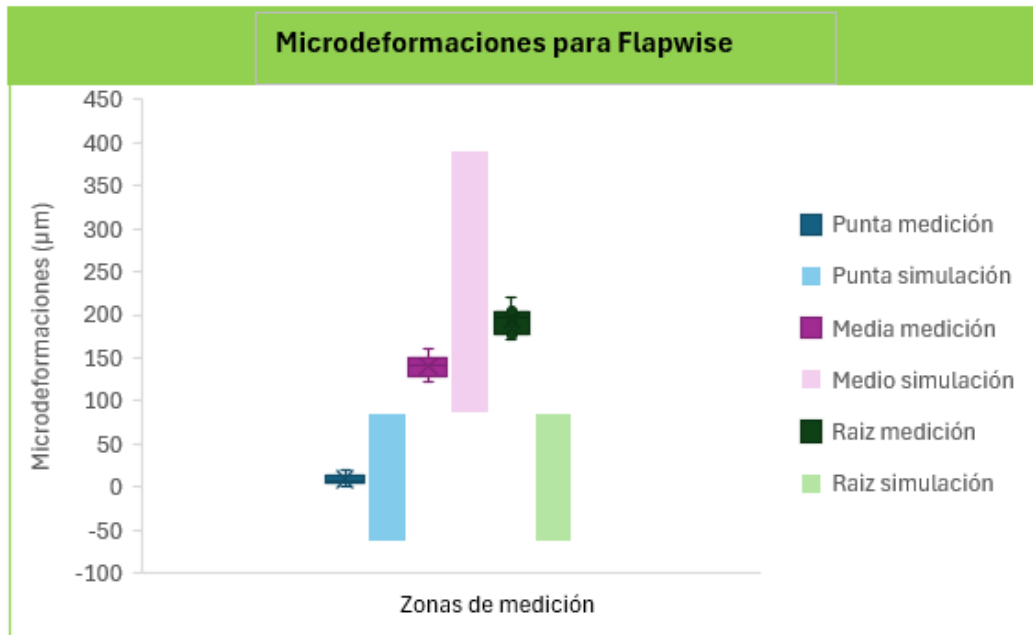
Figura 5.15 Microdeformaciones para Lead-lag de simulación vs medición.



En la figura 5.16, se muestran los valores obtenidos de las pruebas estructurales y de la simulación numérica. En la zona próxima a la punta y la zona media, se observa que los valores obtenidos experimentalmente se encuentran dentro del rango esperado por la simulación. Aunque en la zona media los valores discrepan hasta en 267 micras. Es importante señalar que la galga extensométrica nos da un valor puntual, mientras que los valores de la simulación son representativos de una

zona más amplia del modelo. En el caso de la zona de la raíz son más altos los valores obtenidos de las mediciones.

Figura 5.16 Microdeformaciones para Flapwise de simulación vs medición.



En general, los valores obtenidos mediante técnicas de extensometría son mayores a los estimados mediante simulación numérica. Esta diferencia se debe a la fuente bibliográfica, y en menor proporción al proceso de manufactura, debido a la generación de microburbujas, a desviaciones en la alineación del larguero, etc. Sin embargo, los valores medidos son menores a 300 micras, esto indica que las deformaciones son mínimas y que estructuralmente no fallará de acuerdo con la norma IEC 61400-2. Lo anterior valida el diseño estructural y el proceso de manufactura empleados.

Conclusiones

Se realizó el análisis estructural del álabe con dispositivo FishBAC de una turbina de viento de baja capacidad de acuerdo con la norma IEC 61400-2.

El dispositivo FishBAC se implementó en el diseño del álabe, partiendo de un diseño aerodinámico validado por la teoría BEM, el software QBlade y la simulación CFD. Los resultados mostraron un incremento estimado en la potencia del $15\% \pm 1\%$.

En la simulación estructural del álabe con dispositivo FishBAC se aplicaron las cargas marcadas en la norma IEC 61400-2 y se obtuvieron valores para el criterio de Tsai-Wu menores a 1, lo que indica que el álabe no fallará estructuralmente.

Se manufacturó el álabe con dispositivo FishBAC, empleando el proceso VARTM y la impresión 3D, al cual se le realizaron pruebas estáticas con técnicas de extensometría para comparar los resultados con los obtenidos en la simulación estructural. Si bien se encontraron diferencias de hasta 159 micras en el caso de carga Lead-lag y hasta 267 micras en el caso de carga Flapwise entre los resultados experimentales y los de la simulación, se concluyó que los valores de las microdeformaciones se encuentran dentro de un rango aceptable, ya que son menores a las 300 micras, por lo que el álabe es capaz de soportar las cargas a las que será sometido en funcionamiento.

Es importante destacar que el proceso de manufactura representó un reto considerable. En el caso del proceso VARTM, se requirió un alto nivel de expertiz para lograr una impregnación y curado adecuados de los materiales compuestos. Asimismo, la impresión 3D presentó complicaciones debido a las pequeñas dimensiones y a la complejidad geométrica del álabe, lo que obligó a realizar múltiples iteraciones y ajustes de diseño hasta obtener una pieza funcional.

Esta investigación aborda de forma integral el desarrollo de un álabe con dispositivo FishBAC para una turbina de viento de baja capacidad: desde el diseño aerodinámico y mecánico, incluyendo simulaciones fluidodinámicas y estructurales, así como los procesos de manufactura y la validación experimental mediante pruebas estáticas. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten validar el diseño y el proceso de manufactura empleado, concluyendo que el álabe con dispositivo FishBAC presenta un diseño estructuralmente confiable y seguro para su aplicación en turbinas eólicas de baja capacidad.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se identifican diversas áreas que requieren mayor desarrollo:

- Pruebas en condiciones reales de operación: es necesario realizar pruebas funcionales del álabes instalado en una turbina en condiciones de viento reales. También se recomienda realizar pruebas controladas en túnel de viento, lo que permitiría medir de forma precisa la respuesta del dispositivo FishBAC.
- Desarrollo del sistema de control: es necesario diseñar e implementar un sistema de control para que el dispositivo FishBAC se adapte en función de las velocidades de viento.
- Mejoras al diseño mecánico: el mecanismo actual podría beneficiarse de un rediseño que incorpore sistemas de bloqueo o fijación que permitan mantener el dispositivo en una posición estable una vez alcanzado el ángulo deseado. Esto reduciría el gasto energético del dispositivo.
- Evaluación de vida útil y fatiga: se recomienda realizar estudios de comportamiento a largo plazo, incluyendo análisis de fatiga del material y del mecanismo en sí, para garantizar su funcionamiento al ser sometido a cargas cíclicas.
- Análisis económico y de factibilidad: es necesario realizar un estudio de costos para determinar la viabilidad económica de implementar el dispositivo FishBAC considerando materiales, manufactura y mantenimiento.
- Evaluación ambiental del proceso de manufactura: también se recomienda analizar el impacto ambiental del proceso de manufactura.

Referencias

- [1] IRENA. *Rethinking Energy 2017*. 2017.
- [2] REN 21. *Renewables 2020 Global Status Report*. 2020.
- [3] RENEWABLE ENERGY AGENCY, International, OF ENERGY OF AZERBAIJAN, Ministry, RENEWABLES ALLIANCE, Global and GOVERNMENT OF BRAZIL, Federal. *Delivering on the UAE Consensus: Tracking progress toward tripling renewable energy capacity and doubling energy efficiency by 2030* [online]. [no date]. Available from: www.globalrenewablesalliance.org
- [4] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *GWEC Global Wind Report 2024* [online]. Belgium, 2024. Available from: www.gwec.net
- [5] DHILEEP, Karthick, KUMAR, D., GHOSH, Santanu, ALI, S. Faruque and AROCKIARAJAN, A. Numerical study of camber morphing in naca0012 airfoil. *Aiaa Aviation 2020 Forum*. 2020. Vol. 1 PartF, p. 1–19. DOI 10.2514/6.2020-2781.
- [6] RIVERO, Andres E, WEAVER, P.M., COOPER, J.E. and WOODS, B.K.S. Progress on the design and manufacture of a composite FishBAC morphing aerofoil. *Emgineering and Physycal Sciences*. 2018. No. April.
- [7] WOODS, Benjamin K.S., DAYYANI, Iman and FRISWELL, Michael I. Fluid/structure-interaction analysis of the fish-bone-active-camber morphing concept. *Journal of Aircraft*. 2015. Vol. 52, no. 1, p. 307–319. DOI 10.2514/1.C032725.
- [8] RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK. *REN 21, 2018 Renewables 2018 Global Status Report*. Paris, 2018.
- [9] GWEC. *GWEC Global Wind Report 2019*. Brussels, 2019.
- [10] RIVERO, Andres, FOURNIER, Stephane, WEAVER, Paul M and COOPER, Je. Fabricación y caracterización de un compuesto FishBAC modelo de túnel de viento morphing. *ICAST2018*. 2018.
- [11] HUNTLEY, Samantha J., WOODS, Benjamin K. and ALLEN, Christian B. Computational Analysis of the Aerodynamics of Camber Morphing. . 2019. No. June, p. 1–20. DOI 10.2514/6.2019-2914.
- [12] FINCHAM, J. H.S. and FRISWELL, M. I. Aerodynamic optimisation of a camber morphing aerofoil. *Aerospace Science and Technology*. 2015. Vol. 43, p. 245–255. DOI 10.1016/j.ast.2015.02.023.
- [13] ZHANG, Jiaying, SHAW, Alexander D., WANG, Chen, GU, Huaiyuan, AMOOZGAR, Mohammadreza, FRISWELL, Michael I. and WOODS, Benjamin K.S. Aeroelastic model and analysis of an active camber morphing wing. *Aerospace*

Science and Technology. 2021. Vol. 111, no. January. DOI 10.1016/j.ast.2021.106534.

[14] WERTER, Noud P.M., SODJA, Jurij, SPIRLET, Gregory and DE BREUKER, Roeland. Design and experiments of a warp induced camber and twist morphing leading and trailing edge device. *24th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference*. 2016. No. January, p. 1–20. DOI 10.2514/6.2016-0315.

[15] SONI, Prerna, ANAND BHARADWAJ, S. and GHOSH, Santanu. Optimization of the thrust to lift ratio using camber morphing in flapping airfoil. *AIAA Scitech 2020 Forum*. 2020. Vol. 1 PartF, no. January, p. 1–16. DOI 10.2514/6.2020-1763.

[16] NAVARATNE, Rukshan, DAYANNI, Iman, WOODS, Benjamin K.S. and FRISWELL, Michael I. Development and testing of a corrugated skin for a camber morphing aerofoil. *23rd AIAA/AHS Adaptive Structures Conference*. 2015. No. January, p. 1–10. DOI 10.2514/6.2015-0792.

[17] POHL, M. and RIEMENSCHNEIDER, J. Designing and testing a flexible trailing edge for wind energy turbine blades. *AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 2018*. 2018. No. 209979, p. 1–10. DOI 10.2514/6.2018-1066.

[18] WOODS, Benjamin Ks, BILGEN, Onur and FRISWELL, Michael I. Wind tunnel testing of the fish bone active camber morphing concept. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014. Vol. 25, no. 7, p. 772–785. DOI 10.1177/1045389X14521700.

[19] Posicionamiento_de_Mexico_COP29_rev_CAS_13.11.2024. .

[20] TING, Eric, TECHNOLOGIES, Stinger Ghaffarian, FIELD, Moffett, TECHNOLOGIES, Stinger Ghaffarian and FIELD, Moffett. Static Aeroelastic Scaling and Analysis of a Sub-Scale Flexible Wing Wind Tunnel Model. . 2014. No. January, p. 1–41.

[21] COLI, Theodore and CELI, Roberto. Helicopter Flight Dynamic Simulation With Refined. *Journal of Aircraft*. 2002. Vol. 39, p. 1–39. DOI 10.2514/2.2995.

[22] OZYILDIZ, M, C, Muyan and D, Coker. Strength Analysis of a Composite Turbine Blade Using Puck Failure Criteria Strength Analysis of a Composite Turbine Blade Using Puck Failure Criteria. *Journal of Physics*. 2018. DOI 10.1088/1742-6596/1037/4/042027.

[23] WOOD, D. *Small Wind Turbines. Analysis, Design and Applications*. 2011.

[24] BURTON, Tony, SHARPE, David, JENKINS, Nick and BOSSANYI, Ervin. *Wind Energy Handbook*. Jonh Wiley. England, 2001. ISBN 0471489972.

[25] SCHAFFARCZYK, A P. *Introduction to Wind Turbine Technology*. 2011. ISBN 9781849961745.

- [26] JAIN, Pramod. *Wind Energy Engineering*. 1392. ISBN 9780071714785.
- [27] WEINZIERL, G., WENDLER, J., LENNIE, M. and MOESUS, N. <http://www.q-blade.org>. . 2014.
- [28] MARTEN, David, LENNIE, Matthew, PECHLIVANOGLU, Georgios, NAYERI, Christian Navid and PASCHEREIT, Christian Oliver. Implementation, Optimization, and Validation of a Nonlinear Lifting Line-Free Vortex Wake Module Within the Wind Turbine Simulation Code QBLADE. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016. Vol. 138, no. 7. DOI 10.1115/1.4031872.
- [29] PAHL, G. and BEITZ, W. *Engineering Design*. Springer-Verlag, 1977.
- [30] CROSS. *Metodos de diseño. Estrategias para el diseño de pductos*. 2015. México : Limusa.
- [31] L., March. *In Developments in design Methodology, The Logic of Design*. London : John Wiley & Sons, 1984.
- [32] E., Mattchet and BRIGGS, A.H. *Practical design based on method (Fundamental design method)*. London : S.A. Gregory, 1966.
- [33] FRENCH, M.J. *Engineering Design, The Conceptual Stage*. London : Heinemann, 1997.
- [34] ROOZENBURG, N. and EEKELS, J. *Product design: fundamentals and methods*. John Wiley & Sons, 1995.
- [35] ULLMAN, David G. *The Mechanical Design Process*. 4th. McGraw Hill, 2017. ISBN 9781482257717.
- [36] ARCHER, L. B. *Development in Design Methodology*. London : John Wiley & Sons, 1984.
- [37] G., Taguchi. *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*. Tokyo : Asian productivity organization, 1990.
- [38] YACUZZI, Enrique and MARTÍN, Fernando. QFD: CONCEPTOS, APLICACIONES Y NUEVOS DESARROLLOS E. . P. 1–37. DOI 10.1007/b138775.
- [39] INSTITUTO DE BIOMECÁNICA DE VALENCIA. QFD: Una metodología para el desarrollo de producto. In : . LABEIN, [no date]. p. 16–19.
- [40] SARJA, Jari and HALONEN, Veikko. Wind turbine selection criteria: a customer perspective. *Article in Journal of Power and Energy Engineering*. 2013. Vol. 7, no. January, p. 1795–1802.
- [41] AKAR, Navid, DAJ, Elaheh and BOROOJERDI, Shahrooz Sharifi. Using fuzzy quality function deployment in improving reliability of wind power systems. *International Journal of Engineering Innovation & Research*. 2016. Vol. 5, no. 3, p. 224–229.

- [42] MOO, Eduardo Bocanegra. *Electrificación De Zonas Marginadas Mediate El Empleo De Fuentes De Energia Alternas*. Universidad Tecnologica de Campeche, 2015.
- [43] VALVERDE, Luis Manuel, LOPEZ, Claudio and REYES, Armando. Generación de corriente alterna por medio de una turbina eólica. *Ingeniantes*. 2018. Vol. 2, no. 2, p. 83–86.
- [44] GASCH, R. and TWELVE, J. *Wind Power Fundamentals, Design, Construction and Operation*. 2012.
- [45] PLUMLEY, Charles. *The Smart Rotor Wind Turbine* [online]. University of Strathclyde, 2015. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/277502135>
- [46] THÉ, Jesse and YU, Hesheng. *A critical review on the simulations of wind turbine aerodynamics focusing on hybrid RANS-LES methods*. 2017. Elsevier Ltd.
- [47] SHOURANGIZ-HAGHIGHI, Alireza, HAGHNEGAHDAR, Mohammad Amin, WANG, Lin, MUSSETTA, Marco, KOLIOS, Athanasios and LANDER, Martin. State of the Art in the Optimisation of Wind Turbine Performance Using CFD. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 1 April 2020. Vol. 27, no. 2, p. 413–431. DOI 10.1007/s11831-019-09316-0.
- [48] KHLAIFAT, Nour, ALTAEE, Ali, ZHOU, John and HUANG, Yuhan. *A review of the key sensitive parameters on the aerodynamic performance of a horizontal wind turbine using computational fluid dynamics modelling*. 2020. AIMS Press.
- [49] CHEHOURI, Adam, YOUNES, Rafic, ILINCA, Adrian and PERRON, Jean. *Review of performance optimization techniques applied to wind turbines*. 5 March 2015. Elsevier Ltd.
- [50] O'BRIEN, J. M., YOUNG, T. M., O'MAHONEY, D. C. and GRIFFIN, P. C. *Horizontal axis wind turbine research: A review of commercial CFD, FE codes and experimental practices*. 1 July 2017. Elsevier Ltd.
- [51] LOPEZ GARZA, Victor, HERNANDEZ ARRIAGA, Issac, NAVARRO ROJERO, Maria Guadalupe and LOZANO MANDUJANO, David. Análisis preliminar estructural de un álabe de doble raíz de materiales compuestos para una turbina eólica de 3Kw Preliminary structural analysis of a blade of double root of composite materials for 3Kw wind turbine Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*. 2018. Vol. 5, no. 17, p. 22–30.
- [52] CASILLAS, Christian Erick. *OPTIMIZACIÓN DEL TORQUE DE ARRANQUE DE UNA TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL DE BAJA CAPACIDAD*. 2018.
- [53] WANG, Lin, QUANT, Robin and KOLIOS, Athanasios. Fluid structure interaction modelling of horizontal-axis wind turbine blades based on CFD and FEA. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1 November 2016. Vol. 158, p. 11–25. DOI 10.1016/j.jweia.2016.09.006.

- [54] CAO, Han. *Aerodynamics Analysis of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades by Using 2D and 3D CFD Modelling Student Declaration*. 2011.
- [55] BUSTAMANTRE, Sergio. *MODELACIÓN Y SIMULACIÓN AERODINÁMICA DEL ROTOR DE AEROGENERADOR DE 1,5 MW CARACTERIZADO EN LAS ZONAS DE IMPLANTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA DE CANTABRIA*. Cantabria : ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA, 2014.
- [56] KELELE, Hailay Kiros, NIELSEN, Torbjørn Kirstian, FROYD, Lars and KAHSAY, Mulu Bayray. Catchment based aerodynamic performance analysis of small wind turbine using a single blade concept for a low cost of energy. *Energies*. 1 November 2020. Vol. 13, no. 21. DOI 10.3390/en13215838.
- [57] ALVERNIA, Pimienta and SEBASTIAN, Juan. *Diseño, Simulación y Prototipado de una Turbina Eólica de Baja Velocidad*. [no date].
- [58] H. K. VERSTEEG and W. MALALASEKERA. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Second. 2007.
- [59] M. PERIC and J. H. FERZIGER. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd. [no date].
- [60] WILCOX, David C. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, 2006. ISBN 1928729088.
- [61] JIYUAN TU, GUAN-HENG YEOH and CHAOQUN LIU. *Computational Fluid Dynamics*. Elsevier, 2018. ISBN 9780081011270.
- [62] VERSTEEG, H. K. and MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Second Edi. 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [63] TU, Jiyuan, HENG YEOH, Guan and LIU, Chaoqun. *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. 1995. ISBN 978-0-7506-8563-4.
- [64] SPALART, P. and ALLMARAS, S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In : *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reston, Virigina : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 6 January 1992.
- [65] YAKHOT, Victor and ORSZAG, Steven A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*. 1986. Vol. 1, no. 1, p. 3–51. DOI 10.1007/BF01061452.
- [66] SHIH, Tsan-Hsing, LIOU, William W., SHABBIR, Aamir, YANG, Zhigang and ZHU, Jiang. A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*. March 1995. Vol. 24, no. 3, p. 227–238. DOI 10.1016/0045-7930(94)00032-T.
- [67] JIMÉNEZ, Javier. The Numerical Computation of Turbulence. In : . 2006. p. 281–307.

- [68] WILCOX, David C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, 2016. ISBN 0-9636051-0-0.
- [69] MENTER, F. R., LANGTRY, R. B., LIKKI, S. R., SUZEN, Y. B., HUANG, P. G. and VÖLKER, S. A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables—Part I: Model Formulation. *Journal of Turbomachinery*. 2006. Vol. 128, no. 3, p. 413. DOI 10.1115/1.2184352.
- [70] PERIC, Milovan and FERZIGER, Joel H. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd Editio. [no date]. ISBN 3-540-42074-6.
- [71] BESEDNJAK, Alejandro. *MATERIALES COMPUESTOS: PROCESOS DE FABRICACION DE EMBARCACIONES* [online]. Barselona, 2005. ISBN 9788483018200. Available from: <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- [72] TONG, W. *Wind power generation and wind turbine design*. 2010.
- [73] D. I.M. Y I. O. Engineering mechanics of composite materials. *Oxford University Press*. 2006.
- [74] SCHAFFARCZYK, Alois. *Understanding Wind Power Technology*. [no date].
- [75] BESEDNJAK DIETRICH, Alejandro. *Materiales compuestos : procesos de fabricación de embarcaciones*. [no date]. ISBN 8483018209.
- [76] A. G. D. Y A. T.D. Alternative Composite Material for Megawatt-Scale Wind Turbine Blades: Design Considerations and Reccommended Testing. *Sol. Energy Eng*. 2013. Vol. 125, p. 515.
- [77] JUÁREZ, Erick Pérez. *Construcción de una máquina de ensayo a fatiga para álabes de aerogeneradores de baja capacidad*. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo., 2019.

Anexo A

Encuesta Tecnológica de Aerogeneradores

Mi nombre es Paulina Marin Tellez y soy estudiante del doctorado de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El objetivo de la presente encuesta es recabar información proveniente de especialistas en el área de la energía eólica acerca de los criterios más relevantes al adquirir un aerogenerador, así como de las tendencias en el campo de los aerogeneradores. Por lo cual, le solicito de la manera mas atenta responder a las preguntas partiendo de su experiencia profesional.

La información proporcionada en la presente encuesta tiene fines exclusivamente académicos, la cual contribuirá a mi trabajo de investigación de posgrado; por lo que los datos personales proporcionados serán tratados como confidenciales y anónimos.

Aproximadamente le tomara de 10 minutos responder la encuesta y se recomienda hacerla desde una PC o Tablet para visualizarla correctamente.

Agradezco de antemano su colaboración.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA**



☐ Opción 1

Política de Privacidad *



He leído y acepto la Política de Privacidad <https://drive.google.com/file/d/1FnVD2JUL9RakSHcWk-So-SahHihrVH8V/view?usp=sharing>

Información personal

¿Cuál es tu nombre? (Opcional)

Selecciona tu genero *



Hombre



Mujer

Selecciona tu rango de edad *



20 a 30



30 a 40



40 a 50



50 a 60



más de 60

¿A qué institución o empresa perteneces? *

- ☐ CIATEQ
- ☐ INEL
- ☐ IPN
- ☒ UMSNH
- ☐ UNAM
- ☐ UNITISMO
- ☐ Universidad Técnica Federico Santa María
- ☐ Otra

Si seleccionaste "Otra" escribe cual

.....

¿En qué sector de la industria eólica te desenvuelves? (Puede seleccionar varias opciones) *

- ☒ Diseño
- ☐ Manufactura
- ☐ Investigación
- ☒ Simulación
- ☐ Experimentación
- ☐ Mantenimiento
- ☐ Comercialización
- ☐ Otro

Si seleccionaste "Otro" escribe cual

.....

Parte 1 de 2. Factores relevantes para la adquisición de una turbina eólica

¿Alguna vez has comprado una turbina eólica? *



Si



No

Parte 1 de 2. Factores relevantes para la adquisición de una turbina eólica

Recuerdas ¿Cuál fue la capacidad de la turbina? (en Kilowatts)

.....

¿Cuáles fueron las 3 características que consideraste más importantes para que seleccionaras esa turbina eólica? (Bajo costo, Sustentable, Potencia generada, etc.) *

.....

Parte 1 de 2. Factores relevantes para la adquisición de una turbina eólica

Imagina que próximamente vas a comprar una turbina eólica

Si fueras a comprar una turbina eólica ¿Cuáles consideras que son las 3 características mas importantes para seleccionarla? (Bajo costo, Sustentable, Máxima potencia generada, etc.) *

Eficiente, costo y sustentable

Parte 1 de 2. Factores relevantes para la adquisición de una turbina eólica

Considera que vas a comprar próximamente una turbina eólica

En la siguiente tabla marca la importancia que consideras que tiene cada factor al seleccionar una turbina eólica. Donde 0 significa nada importante, 1 poco importante y 5 muy importante. *

	0	1	2	3	4	5
A. Bajjo costto	☐	☐	☐	☐	☒	☐
B. Poco rruido	☐	☐	☐	☒	☐	☐
C. Segurriidad	☐	☐	☐	☐	☐	☒
D. Tamaño rreduciido	☐	☐	☒	☐	☐	☐
E. Buen serviicio all cliiiente dell vendedorr	☐	☐	☒	☐	☐	☐
F. Esperranza de viida úttiill	☐	☐	☐	☒	☐	☐
G. Pottenciia generrada	☐	☐	☐	☐	☐	☒
H. Susttenttablle	☐	☐	☐	☐	☐	☒
II. Tiempo de enttrrega	☐	☐	☐	☐	☐	☒
J. Disponiibillidad de rrepuestos	☐	☐	☐	☐	☐	☒
K. Númerro de parrttes	☐	☐	☐	☐	☐	☒
L. Cumplle con normmas de calliidad	☐	☐	☐	☐	☐	☒
M. Calliidad de llos matterriiales de fabrriicaciión	☐	☐	☐	☐	☐	☒

N. Arranque a bajas velocidades	☐	☐	☐	☐	☐	☒
O. Eficiencia	☐	☐	☐	☐	☐	☒
P. Mantenimiento sencillo	☐	☐	☐	☐	☐	☒
Q. Fácil operación	☐	☐	☐	☐	☐	☒
R. Estética	☐	☐	☐	☐	☒	☐
S. Ubicación del distribuidor	☐	☐	☐	☐	☐	☒
T. Garantía	☐	☐	☐	☐	☐	☐
U. Servicio de mantenimiento	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Parte 1 de 2. Factores relevantes para la adquisición de una turbina eólica

Hay alguna otra u otras características que creas que influyen en la selección de una turbina eólica que no estén en la tabla. ¿Cuál (es)? (que puntuación le darías del 1 al 5) *

Facilidad de instalación, 5 puntos

Parte 2 de 2. Tendencias en las turbinas eólicas

Por favor mira unos segundos del siguiente video que muestra un dispositivo FishBac (Fish Bone Active Camber)



¿Antes de hoy, habías leído o escuchado sobre las siguientes tecnologías? Marca todas las casillas de las que reconoces

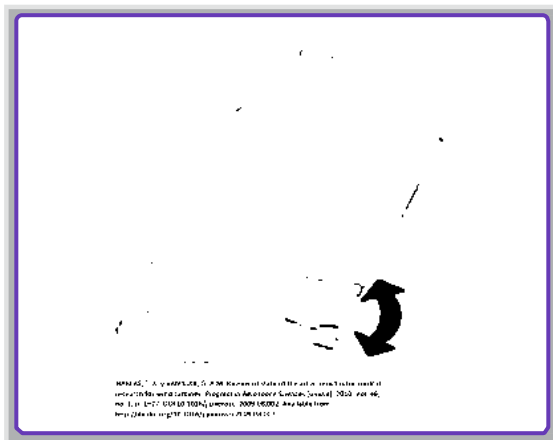
*



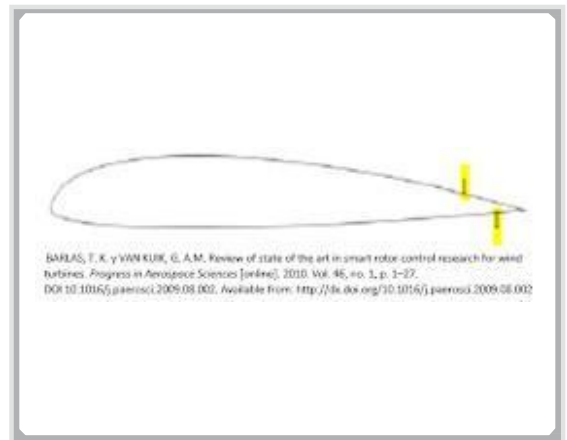
Álabes flexibles: compuestos por un material rígido como soporte y un material elastómero, lo cual le permite que el borde de salida se deforme en la dirección del viento y esto resulta en un aumento del arrastre y la eficiencia.



Álabes con FishBac: incorpora un mecanismo que permite cambiar la curvatura del borde de salida en un perfil aerodinámico de forma suave y continua, para controlar la sustentación y el arrastre con el fin de mejorar la eficiencia del perfil.

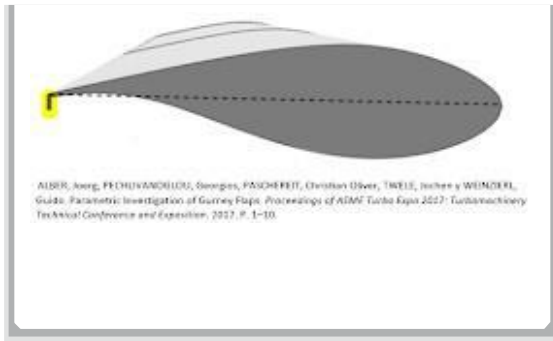


Álabes con flaps: un flap es una pequeña superficie móvil que se encuentra en el borde de fuga que altera la distribución de presión, aumentando la sustentación y reduciendo las cargas en el álabes.



Álabes con microtabs: los microtabs son pequeñas pestañas colocadas cerca del borde de salida del perfil aerodinámico y normales a esta superficie.





Álabe con Gurney flap: este tipo de flap consiste en una pestaña plana rectangular ubicada de forma perpendicular al perfil y en el borde de salida, su finalidad es aumentar la fuerza de sustentación.

☐

¿Cuál de los dispositivos anteriores consideras que es más eficiente? *

☒

Álabes flexibles

☐

FishBac

☐

Flaps

☐

Microtabs

☐

Gurney flap

¿Por qué? *

Es flexible a la dirección del viento

¿Cuál dispositivo consideras que necesita ser investigado más ampliamente? *

☒ Álabes flexibles

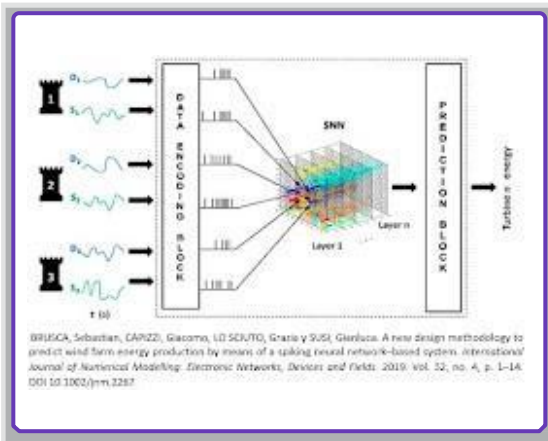
☐ FishBac

☐ Flaps

☐ Microtabs

☐ Gurney flap

¿Has leído o escuchado de las siguientes tendencias en el área de las turbinas eólicas? Marca * todas las casillas de las que reconoces



☒ Redes neuronales



☒ Turbinas reciclables



☐ Biomimética (Se inspira en la naturaleza)



☒ Sistemas híbridos



☐ Otro:

.....

- ☐ Aerogeneradores sin palas
(Usan los principios de la
resonancia aerolástica,
electrostática, etc)

La Biomimetica toma la naturaleza como inspiración para nuevas tecnologías. ¿Has escuchado * o leído sobre las siguientes investigaciones inspiradas en la naturaleza? Marca todas las casillas de los que reconoces



☐ Colibrí (minimizar el ruido y reducir el tamaño)



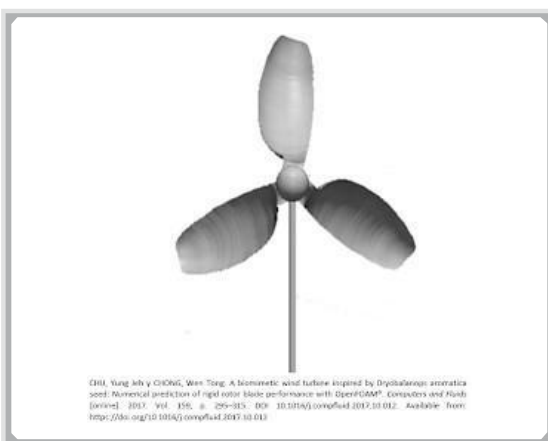
☐ Pez (mejorar la eficiencia modificando el ángulo de curvatura del perfil)



☒ Árbol (aprovechar velocidades de viento muy bajas e integrarse al entorno)



☐ Aletas de ballena (mejorar la eficiencia y reducir el ruido)



- ☐ Flor Dryobalanops (reducir costo y trabajar en bajas velocidades del viento)



WADA, Tetsuki, SANAMA, Hiroshi, YOSHIMIZU, Kenzou, AGATA, Ryoichi, FUJII, Takao y ISEI, Hiromi. A robust biomimetic blade design for micro wind turbines. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 125, p. 100-109. DOI:10.1016/j.renene.2018.02.085.

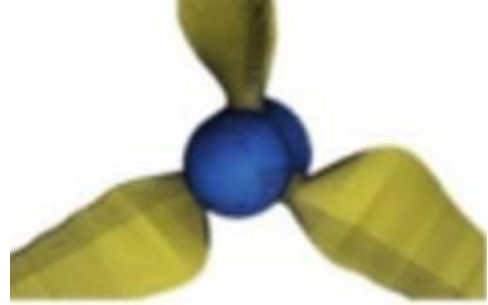
- ☒ Ala de pájaro (mejorar la potencia de salida)



Flower of Nelumbo rustica at Botanic Garden, Adelaide, South Australia 2018

- ☐ Flor de loto (recubrimiento resistente a la erosión eólica, calor y humedad para álabes)

- ☐ Cardumen (mejorar la eficiencia energética)



CHEN, Kun, YAO, Wei wei, WEI, Jian hui, GAO, Rui biao y LI, Yi xiao. Bionic coupling design and aerodynamic analysis of horizontal axis wind turbine blades. *Energy Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 10, p. 1826-1838. DOI:10.1002/ese3.953.

- ☐ Ala de búho (reducir el ruido)



PARVA, Lohar y DE AZHMEIDA, Odette. Experimental Measurements on Biomimetic Wind Turbine Blades By G. Multi-Rune Serot. 2023. No. August. DOI:10.23676/950m-colom.2023-0613.

- ☒ Semilla (optimización de la forma aerodinámica del álabes)

¿Cuál de las anteriores opciones crees que tiene mayor potencial de investigación? *

- ☐ Colibrí
- ☐ Pez
- ☐ Flor Dryobalanops
- ☐ Cardumen
- ☒ Ala de pájaro
- ☐ Ala de búho
- ☐ Flor de loto
- ☐ Semilla
- ☐ Árbol

¿Conoces alguna otra investigación sobre biomimética con aplicación en aerogeneradores de eje horizontal?(Opcional)

No

Reporte de resultados

Como participante en esta encuesta, ¿quieres que se te haga llegar a tu correo electrónico un reporte con los resultados? *

- ☐ Sí
- ☒ No

¿Cuál es su correo electrónico?(Opcional)

GRACIAS POR TU PARTICIPACIÓN

Gracias y éxito

Este formulario se creó fuera de tu dominio.

Google Formulario

Anexo B

Parámetros de calidad de la malla

La calidad de la malla juega un papel importante en la estabilidad, exactitud y tiempo de los cálculos numéricos por lo que es importante evaluarla antes de resolver el modelo. Entre los problemas que puede causar una mala calidad de la malla se encuentran las dificultades de convergencia, una mala descripción del fenómeno físico y soluciones difusas [52].

Los parametros mas importantes que nos ayudan a evaluar la calidad de la malla son la relacion de aspecto, la relacion jacobiana, el esquinamiento y la desviacion paralela. Existen otros parametros que tambien deben tomarse en cuenta como son el factor de deformacion, el angulo de esquina maximo, la calidad ortogonal, la calidad del elemento y la longitud caracteristica [54]. Vease tabla 8.

Tabla 1. Espectro de calidad de los parámetros de malla [54].

Parametro	Espectro de parametros de malla
Relacion de aspecto	
Relacion jacobiana	
Esquinamiento	
Desviacion paralela	
Factor de deformacion	
Calidad ortogonal	
Calidad del elemento	

- Relación de aspecto: es una medida del estiramiento de un elemento. Se calcula como la relación entre el valor máximo y el valor mínimo de cualquiera de las siguientes distancias: las distancias normales entre el centroide de la

celda y los centroides de la cara, y las distancias entre el centroide de la celda y los nodos [54].

- Relación jacobiana: es una medida de la forma de un elemento dado en comparación con la de un elemento ideal. Si un elemento tiene una relación jacobiana de mala calidad, es posible que no se asigne bien desde el espacio del elemento al espacio real, por lo que los cálculos basados en la forma del elemento son menos confiables. La proporción jacobiana no se calcula para los triángulos y tetraedros que son lineales o que tienen nodos del lado medio de lados rectos [52]. Véase figura 49.

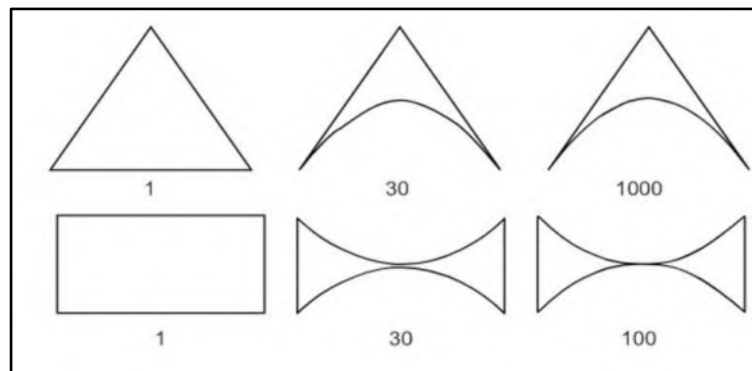


Figura 1. Relación jacobina para triángulos y cuadriláteros [54].

- Esquinamiento: determina qué tan cerca de lo ideal (es decir, equilátero o equiangular) está una cara o un elemento. Caras muy esquinadas pueden reducir la exactitud y desestabilizar la exactitud de la solución. Las mallas cuadriláteras optimas son aquellas con ángulos en los vértices próximos a 90° mientras que las mallas triangulares deben tener ángulos próximos a 60° [52].
- Desviación paralela: se calcula y se prueba para todos los cuadriláteros o elementos sólidos en 3D que tienen caras o secciones transversales de cuadriláteros [52]. Véase figura 50.

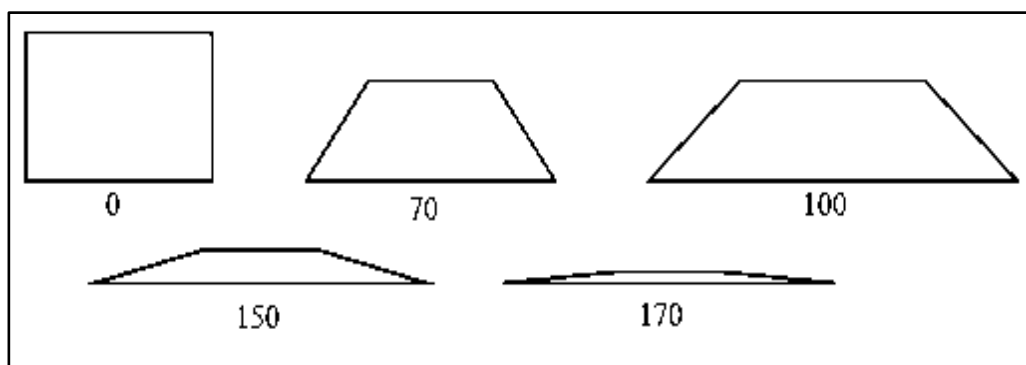


Figura 2. Desviación paralela para cuadriláteros [54].

- Factor de deformación: un factor alto puede indicar una condición que la formulación del elemento subyacente no puede manejar bien, o simplemente puede insinuar un defecto de generación de malla [52]. Véase figura 51.

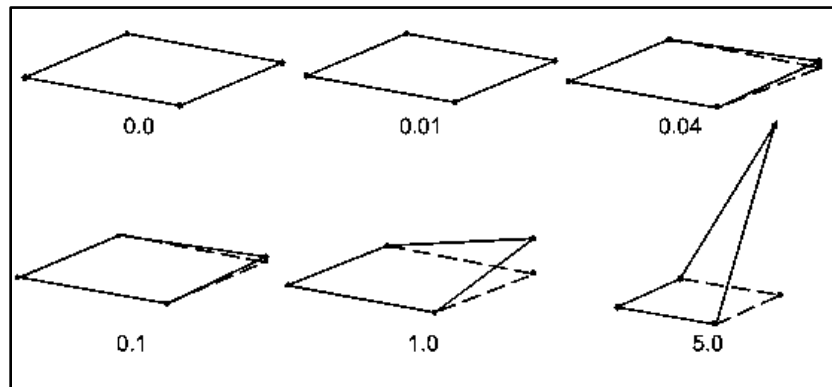


Figura 3. Factor de deformación para una cara cuadrilátera [54].

- Angulo de esquina máximo: el mejor ángulo máximo posible para un triángulo, para un triángulo equilátero, es de 60° mientras que el mejor ángulo máximo de cuadrilátero posible, para un rectángulo plano, es de 90° [54].
- Calidad ortogonal: se calcula utilizando el vector normal del borde y el vector desde el centroide de la cara hasta el centroide de cada borde. Véase figura 52 [54].

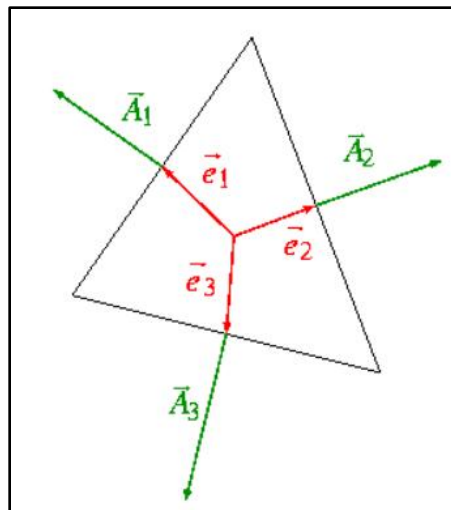
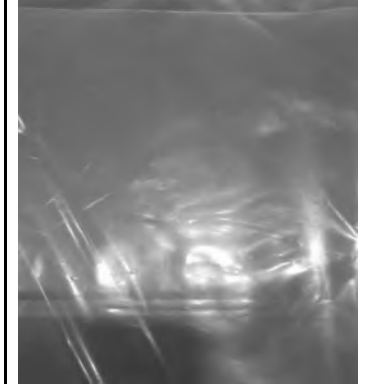


Figura 4. Vectores utilizados para calcular la calidad ortogonal [54].

- Calidad del elemento: se basa en la relación del volumen a la suma del cuadrado de las longitudes de borde para los elementos 2D, o la raíz cuadrada.

Material necesario						
	Nombre	Cantidad (aprox)	Unidad	Disponibilidad	Fecha de caducidad	Especificaciones generales
	Fibra de vidrio unidireccional	2 rectángulos de 0.6 x 0.5	m	3m (ancho 0.8m)	-	Patron de tejido Tricot, densidad 1247g/m2
	Fibra de vidrio bidireccional	3 rectángulos de 0.6 x 0.5	m	6m (ancho 0.8 m)	-	Patron de tejido 45° - 45°, densidad 830 g/m2

	Resina epóxica/ catalizador	3/0.87	lt	20/6 kg	oct-26	Relacion 100/ 29 de resina KFR- 120V/catalizador KFH-163
	Cera desmoldante	1	lata	300g	jul-25	-
	Película desmoldante	1	botella	1000 ml		-

	Tela desmoldante	2 rectángulos de 0.6 x 0.5	m	2m (ancho 0.7 m)	-	-
	Malla de flujo	2 rectángulos de 0.6 x 0.5	m	2m (ancho 1 m)	-	-
	Bolsa de vacío	2 rectángulos de 0.7 x 0.6	m	2m (ancho 1.8 m)	-	-

	Tacky tape	2.5	m	3.5 m	nov-25	-
	Cinta azul	1	m	2 rollos	mar-26	-
	Manguera	2	m	6 m	-	Diametro externo 1/2 in

	Manguera en espiral	1.4	m	9 m	-	Diametro externo 10 mm
	Conector	1	pza	2 pzas	-	Diametro interno 1/2 in

Data Issued : 1, July 2015
TDS No. : KCNCT - 120V141163
Data Revised :
Revision No. :



ISO 9001:2000
ISO 14001:2004
Issued by BUREAU VERITAS

Technical Data Sheet

KUKDO Epoxy systems for composites

KFR-120V with KFH-141, 163



GL approved product
WP 0920024 HH
WP 1020034 HH

1. General Description

KFR-120V/KFH-141 and 163 systems are KUKDO's infusion epoxy system which has low viscosity with high mechanical and thermal properties comparing with general epoxy system. KFR-120V is a bisphenol A type liquid epoxy resin with reactive diluents, and KFH-141 and 163 are low viscous amine type hardener for KFR-120V. These system can be available for ambient temperature curing to heat curing and pot life is 100 ~ 200 minutes at 1000g scale.

2. Specification

2.1 Epoxy Resin

ITEM (Measured at 25°C)	KFR-120V
Equivalent Weight (g/eq, EEW) ISO 3001	170~175
Density (g/mL) ISO 1675	1.0~1.2
Color (Gardener)	0.5 Max
Viscosity (cps) ISO 2555	800~1,100

2.2 Hardener

ITEM (Measured at 25°C)	KFH-141	KFH-163
Total Amine Value (mgKOH/g) KD-AS-201-01	500~700	400~600
Density (g/mL) ISO 1675	0.8~1.0	0.9~1.0
Color(Gardner)	5 Max	5 Max
Viscosity (cps) ISO 2555	5~50	5~50

2.3 Systems

ITEM (Measured at 25°C)		KFR-120V	
		KFH-141 Fast	KFH-163 Standard
Mixing Ratio of Epoxy Resin/ Hardener (wt%)		100 : 30	100 : 30
Density of Mixture (g/mL) ISO 1675		1.0~1.2	1.0~1.2
Viscosity of Mixture (cps) ISO 2555		150~300	150~300
Tg (°C) ISO 11357-2	Cure 24 h at RT+ 16 h at 50°C	70 ~ 80	70 ~ 80
Pot Life (min) ISO 9514	25°C, 65 RH, 100g Scale	100	250

3. Mechanical Properties of Neat Resins

ITEM (Measured at 25°C) [Cure 24 h at RT, 16 h at 50°C]z		KFR-120V	
		KFH-141 Fast	KFH-163 Standard
Curing shrinkage (wt%) DIN 16945, Section 6.5		< 2.0	< 2.0
Cured density (g/cm ³) ISO 1183		1.1~1.2	1.1~1.2
Water absorption (wt%) ISO 175	23°C, 65 RH 24hr 168hr	< 0.1 < 0.3	< 0.1 < 0.3
Tensile Property ISO 527-2	Strength (MPa) Modulus (GPa) Elongation (%)	> 70 > 2.8 > 4.5	> 60 > 2.8 > 4.5
Flexural Property ISO 178	Strength (MPa) Modulus (GPa)	> 120 > 2.5	> 10 > 2.5

4. Applications

- 1) Composites
Infusion process
- 2) Coatings
- 3) Molding

The property values described in this technical data indicates the representative value of each product, and is not a guarantee value. It is what made based on this technical intelligence thought to be able to trust technical Data at present and our examination result. Please confirm presence in the performance and the effect before hand by your use conditions when you use it. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of KUKDO Chemical Co., Ltd.

CNC Division, KUKDO Chemical Co., Ltd.

Tel : +82-23282-1527
Fax : +82-2-3282-1588
E-mail : cnc@kukdo.com

Technical Data Sheet

**EPIKOTE™ Resin MGS™ BPR 135G-Series and
EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 134G-137GF****CHARACTERISTICS**

Approval	DNV-GL SE (Germanischer Lloyd)
Application	Secondary bonding of FRP to FRP and various materials. Production of rotor blades for wind energy plants, shipbuilding, sporting goods, moulds and other devices.
Operational temperature	-60°C up to +50°C without heat treatment -60°C up to +80°C with heat treatment
Processing	Generally process temperatures between 10°C – 50°C, depending on individual production conditions.
Features	fills gaps of up to approx. 30 mm without sagging, good sag resistance at elevated temperature
Storage	Shelf life of at least 24 months in originally sealed containers

APPLICATION

Adhesive EPIKOTE™ MGS™ BPR 135G-Series is a solvent free epoxy based bonding paste with a wide range of applications. It is suitable for bonding laminates and wood and appropriately metallic and mineral components.

Paste Application – Sagging / Vertical Gaps

The system is particularly suitable for vertical surfaces and wide gaps and is designed not to sag at typical cure temperatures. The bonding paste does not bleed out of vertical gaps even if the parts are immediately cured.

Bonding Paste Resins

EPIKOTE™ Resin MGS™ BPR 135G2 paste thickness up to app. 5 mm

EPIKOTE™ Resin MGS™ BPR 135G25 paste thickness up to app. 15 mm

EPIKOTE™ Resin MGS™ BPR 135G3 paste thickness up to app. 30 mm

Bond lines

Bond line thickness control is important for any structural adhesive joint application to obtain consistent and optimal adhesive joint properties. For larger parts, such as found in boat and wind turbine blade production, bond line thicknesses of 1-10 mm are generally targeted. Due to the glass fibre in the 135G bonding paste system, improved fatigue properties, higher cohesive strengths and lower exotherms, have been observed. In applications where bond line thicknesses may be greater than 10 mm the effects of higher exotherm

temperatures and lower adhesive joint properties should be evaluated.

Bonding Paste Systems

All the bonding paste resins (EPIKOTE™ Resin MGS™ BPR 135G2, 135G25, 135G3) can be processed with the following specially modified curing agents:

EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 134G	very fast curing agent
EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 1340G	very fast curing agent
EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 1355G	fast curing agent
EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 135G	medium curing agent
EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 136G	slow curing agent
EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 137G	very slow curing agent
EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 137GF	very slow curing agent with fast Tg-development

Surface Preparation

Direct application to non-porous material surfaces is possible. Porous, absorbent surfaces should be primed with a liquid resin mix (e.g. laminating resin MGS™ LR135 with curing agents MGS™ LH133-138). The bonding paste can then be applied either immediately or following slight gelling. Priming with bonding paste is not recommended.

Mixing

Adding more or less curing agent outside the permissible tolerance range will not speed up or slow down the reaction rate (gel time) – it will cause incomplete curing of the bonding paste which cannot be corrected in any way by reworking.

The resin and curing agent components are thick and must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. The different colours of the resin and curing agent components facilitate visual verification. Pay special attention to the walls and the bottom of the mixing container. Manual mixing of larger quantities of resin and curing agent is very difficult due to the high viscosity of the components. In order to guarantee good mixing of large volumes in production, the use of suitable mixing machines is essential.

Applying & Curing

The recommended temperature for mixing and application is around 20 - 30°C. In general the part surface temperature should be <35°C when bonding paste is applied, depending on gap thickness and resin type, however higher surface temperatures can be possible. In any case, detailed processing tests are recommended. All excess bonding paste should be removed from the bond lines before cure. Parts should be heated at a slow rate (e.g. < 1°C/ minute) to minimize internal stresses during the curing process, see the table below. For thick bond lines (typically > 10 mm) a stepped cure may be necessary to avoid temperature excursions due to exothermic reaction of the bonding paste.

In parts with thick bond lines, temperatures at the centre of the bonding paste can be measured to help design/ define the cure profile to optimize manufacturing efficiency and adhesive performance.

Gap thickness	Part surface temperature when applying bonding paste	Suggested cure schedule
< 10 mm	up to cure temperature	1. ramp at < 1°C/minute 2. hold at ~ 75°C for 4 hrs

		3. cool to ambient at < 1°C/minute
10 – 20 mm	< 40°C	1. ramp at < 1°C/minute 2. hold at ~ 50°C at 1 hr 3. ramp at < 1°C/minute 4. hold at ~ 75°C for 4 hrs 5. cool to ambient at < 1°C/minute
20 – 30 mm	< 35°C	1. ramp at < 0.5°C/minute 2. hold at ~ 50°C at 1 hr 3. ramp at < 1°C/minute 4. hold at ~ 75°C for 4 hrs 5. cool to ambient at < 1°C/minute.

The information in the table is just a basic recommendation and can't replace processing tests based on the specific conditions at usage.

Storage

The resins and curing agents can be stored for at least 24 months in the carefully sealed original containers. The products do not crystallize at storage temperatures between 10°C and 30°. At storage temperatures above 30°C, some liquid formation may be observed for the curing agents, which is a natural phenomenon for pastes. Liquid formation will increase with storage time and storage temperature.

SPECIFICATIONS

Property	Unit	Resin BPR 135G3	Resin BPR 135G25	Resin BPR 135G2
Colour		yellow	white	white
Density ¹⁾	g/cm ³	1,2 – 1,3	1,15 – 1,25	1,1 – 1,2
Viscosity ³⁾	Pa·s	30 – 50	25 – 35	15 – 20

Property	Unit	Curing Agent BPH 1340G	Curing Agent BPH 134G	Curing Agent BPH 1355G
Colour		red	red	red
Density ¹⁾	g/cm ³	1,05 – 1,15	1,05 – 1,15	1,05 – 1,15
Viscosity ³⁾	Pa·s	10 – 20	10 – 20	10 – 20
Pot life ²⁾	min	15 – 45	15 - 30	30 – 60

Property	Unit	Curing Agent BPH 135G	Curing Agent BPH 136G	Curing Agent BPH 137G	Curing Agent BPH 137GF
Colour		red	blue	blue	blue
Density ¹⁾	g/cm ³	1,05 – 1,15	1,05 – 1,15	1,05 – 1,15	1,05 – 1,15
Viscosity ³⁾	Pa·s	10 – 20	10 – 20	10 – 20	10 – 20
Pot life ²⁾	min	60 – 100	100 – 150	120 – 170	130 – 180

The pot life measurement is a test to evaluate the quality of a product under constant conditions. Different local factors like humidity, temperature or mass of the applied material, time of exposure to atmosphere (and others) are directly influencing the material properties (processing and mechanical). To operate successfully the production parameters have to be determined individually by the user.

Measuring conditions:

- 1) measured at 25°C
- 2) 100g sample in water bath at 30°C
- 3) plate-to-plate rheometer, gap 0.5mm, 25°C, shear rate 100 s⁻¹

	BPR 135G2 with all curing agents
Density ¹⁾ (mixed)	1,05 – 1,15
Density ¹⁾ (cured)	1,10 – 1,20

	BPR 135G3 with all curing agents
Density ¹⁾ (mixed)	1,15 – 1,25
Density ¹⁾ (cured)	1,20 – 1,30

Measuring conditions:

- 1) measured at 25°C

MIXING RATIO

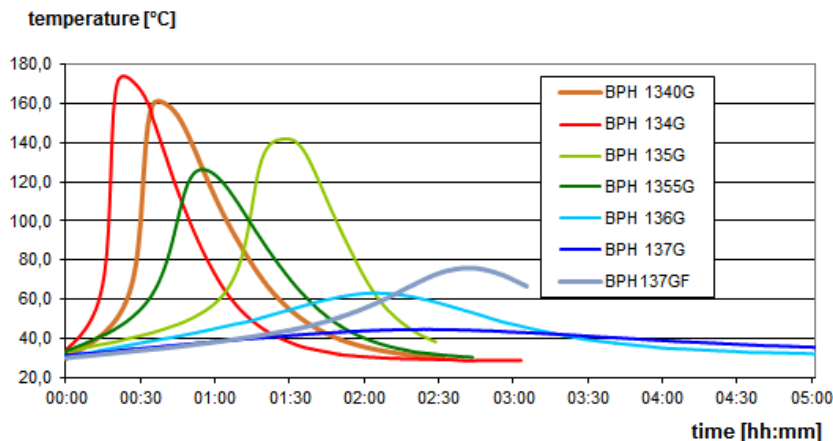
	BPR 135G with all curing agents
Parts by weight	100 : 45 ± 2
Parts by volume	100 : 50 ± 2

The mixing ratio stated must be observed very carefully. Adding more or less curing agent will not result in a faster or slower reaction, but in incomplete curing which cannot be corrected in any way.

Resin and curing agent must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and bottom of the mixing container.

TEMPERATURE DEVELOPMENT

Development of temperature BPR 135G3



Measuring conditions: measured 100g in a paper cup with a lid isolated in a water bath at 30°C starting at 30°C

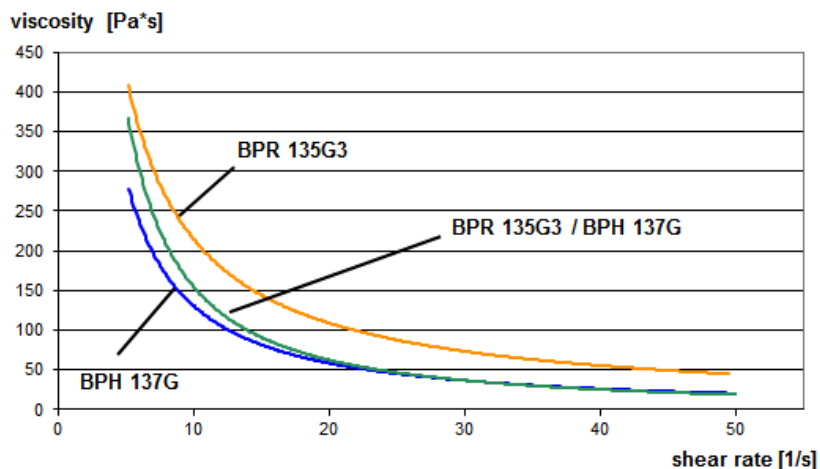
The optimum processing (mixing) temperature is in the range of 20°C to 30°C. Higher temperatures are possible, but will shorten pot life. A temperature increase of 10°C will halve the pot life. Water (e.g. high humidity or contained in additional fillers) causes an acceleration of the resin/ curing agent reaction. Different temperatures and humidity during processing are not known to have significant impact on the mechanical properties of the cured product.

Do not mix large quantities – particularly of highly reactive systems – at elevated processing temperatures. As the heat dissipation in the mixing container is very slow, the contents will be heated up by the reaction heat (exothermic resin-curing agent reaction) rapidly. This can result in temperatures of more than 200°C in the mixing container, which may cause smoke-intensive burning of the resin mass.

FLOW CURVE

Flow curve (Viscosity as a function of shear rate)

BPR 135G3 with curing agent BPH 137G



Measuring conditions:

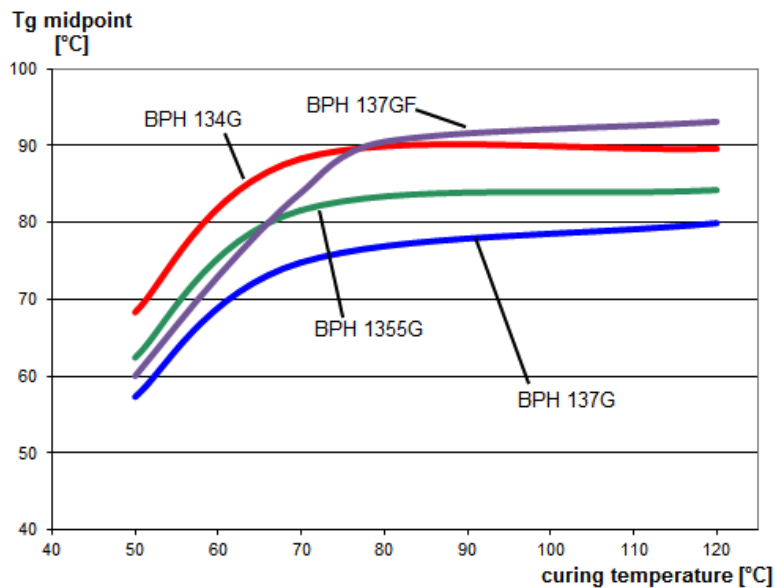
Shear rate: variable

Temperature: 25°C

Physica MC1, plate-plate configuration

GLASS TRANSITION TEMPERATURE

Development of the glass transition temperature



Measuring conditions:

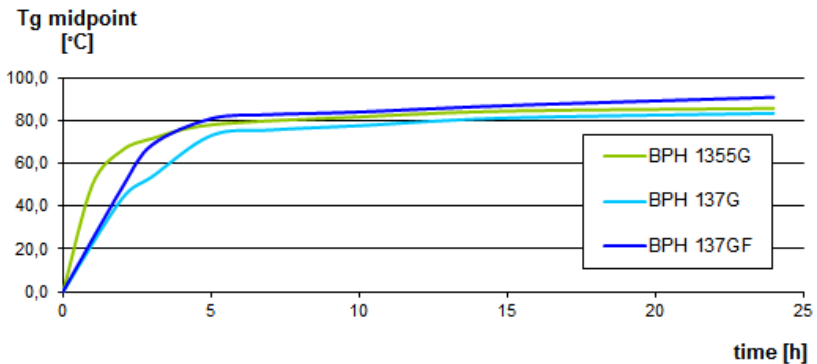
Curing: in oven for 10 hours at different temperatures

DSC-measuring heat rate: 10 K/min

Diagram states Tg midpoint

Tg DEVELOPMENT

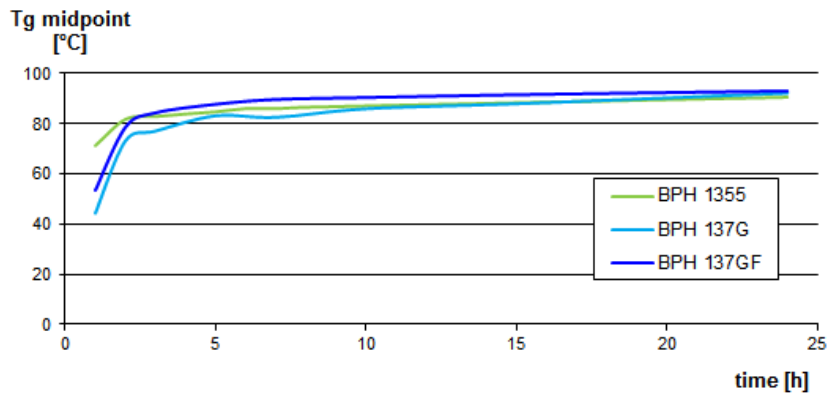
Development of the glass transition temperature



Measuring conditions:

Curing: in oven at 70°C

DSC-measuring heat rate: 10 K/min



Measuring conditions:

Curing: in oven at 80°C

DSC-measuring heat rate: 10 K/min

MECHANICAL DATA

Mechanical data		
lap shear strength [N/mm²] DIN EN ISO 1465 Curing: 7h/70°C	bonding gap	
	0,5 mm	3 mm
at standard climate	approx. 24,0	approx. 15,0
Peel strength [N/mm] DIN EN ISO 11339	2,8	

EPIKOTE Resin MGS BPR 135G-Series and EPIKURE Curing Agent MGS BPH 134G-137GF

Curing: 7h/70°C				
tensile test DIN EN ISO 527 Curing: 10h/70°C	T _{g midpoint} [°C]	tensile strength [MPa]	tensile modulus [MPa]	ultimate strain [%]
	81	75	5500	2,9
bending test DIN EN ISO 178 Curing: 10h/70°C	T _{g midpoint} [°C]	bending strength [MPa]	bending modulus [MPa]	ultimate strain [%]
	81	110	5300	2,7

Advice:

Mechanical data is typical for the combination of EPIKOTE™ Resin MGS™ BPR 135G3 with EPIKURE™ Curing Agent MGS™ BPH 137G/137GF. Data can differ in other applications.

® and ™ Licensed trademarks of Hexion Inc.

DISCLAIMER

The information provided herein was believed by Hexion Inc. ("Hexion") to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use. All products supplied by Hexion are subject to Hexion's terms and conditions of sale. **HEXION MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION,** except that the product shall conform to Hexion's specifications. Nothing contained herein constitutes an offer for the sale of any product.

PDS-8230- (Rev.10/26/2016 2:44:56 PM)

Anexo D

Estadística descriptiva						
Zona	Lead-lag			Flapwise		
	Punta	Media	Raiz	Punta	Media	Raiz
Media	1.02	40.8	135.88	9.3	140.15	193.6
Error típico	0.292058143	0.993858693	1.874346689	1.258863314	2.740798001	3.252852999
Mediana	1	39	135	8	140.5	196
Moda	0	34	134	8	149	201
Desviación estándar	2.065162938	7.027642215	13.25363254	5.629807887	12.25722129	14.54720085
Varianza de la muestra	4.264897959	49.3877551	175.6587755	31.69473684	150.2394737	211.6210526
Curtosis	-0.461850116	-1.328018262	0.914720687	-0.789476969	-1.423793923	-1.143051789
Coefficiente de asimetría	-0.389894984	0.236448229	-0.12845128	0.264639665	0.039897947	0.133699461
Rango	8	22	68	20	38	49
Mínimo	-4	31	101	1	123	172
Máximo	4	53	169	21	161	221
Suma	51	2040	6794	186	2803	3872
Cuenta	50	50	50	20	20	20
Nivel de confianza(99.0%)	0.782701798	1.997233819	3.766640692	2.634831196	5.736556145	6.808299572

Actividades de difusión y divulgación

Artículo **Revista de Simulación y Laboratorio**
Marzo 2019 Vol.6 No.18 24-31

Simulación y pruebas de laboratorio de un aspa de turbina de viento de 600W de acuerdo a la Norma IEC-61400-2

Simulation and laboratory testing of a 600W wind turbine assembly according to the standard IEC-61400-2

MARIN-TELLEZ, Paulina^{1*}, LÓPEZ-GARZA, Víctor, PÉREZ-JUÁREZ, Erick y GONZÁLEZ-ÁVALOS, Gilberto

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

ID 1^{er} Autor: Paulina, Marin-Tellez / ORC ID: 0000-0003-2966-3409, Researcher ID Thomson: G-2113-2019, CVU CONACYT ID: 928539

ID 1^{er} Coautor: Victor, López-Garza / ORC ID: 0000-0001-9090-9119, Researcher ID Thomson: H-6969-2018, Open ID 107470673007841597382, CVU CONACYT ID: 554311

ID 2^{do} Coautor: Erick, Pérez-Juárez / ORC ID: 0000-0003-3069-7198 Researcher ID Thomson: G-4108-2018, Open ID: 111977551830633714492, CVU CONACYT ID: 815741

ID 3^{er} Coautor: Gilberto, González-Ávalos / ORC ID: 0000-0002-8041-7847, CVU CONACYT ID: 122994

DOI: 10.35429/JSL.2019.18.6.24.31 Recibido 23 Enero, 2019; Aceptado 30 Marzo, 2019

Article **Journal Innovative Design**
June, 2021 Vol.5 No.12 1-9

Proposal for structural testing of double root low capacity wind turbine blades based on the Iec 61400-2 Standard

Propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbina de viento de baja capacidad de doble raíz con base a la Norma IEC 61400-2

SANTIBÁÑEZ-MALDONADO, Adrian^{1*}, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SORIANO-PEÑA, Juan Felipe and MARIN-TELLEZ, Paulina

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

ID 1^{er} Author: Adrian, Santibañez-Maldonado / ORC ID: 0000-0003-2090-8556, Researcher ID Thomson: AAF-7625-2021, CVU CONACYT ID: 1009490

ID 1^{er} Co-author: Victor, López-Garza / ORC ID: 0000-0001-9090-9119, Researcher ID Thomson: H-6969-2018, CVU CONACYT ID: 554311

ID 2nd Co-author: Juan Felipe, Soriano-Peña / ORC ID: 0000-0003-1370-2274, CVU CONACYT ID: 233426

ID 3rd Co-author: Paulina, Marin-Tellez / ORC ID: 0000-0003-2966-3409, Researcher ID Thomson: G-2113-2019, CVU CONACYT ID: 928539

DOI: 10.35429/JID.2021.12.5.1.9 Received March 23, 2021; Accepted June 30, 2021

SPRINGER NATURE Link Acceso

Menú Buscar Carro

Hogar MRS Advances Artículo

Evaluación estructural de materiales compuestos de fibras naturales para palas de aerogeneradores de baja capacidad

Documento original Publicado:13 de diciembre de 2024

(2024) Cite este artículo

MRS Advances

Objetivos y alcance

Enviar manuscrito

Paulina Marín-Tellez ✉, Víctor López-Garza, Juan Felipe Soriano-Peña, Gerardo Javier Marín-Tellez & Adrián Santibañez-Maldonado

energies MDPI

Article

Structural and Modal Analysis of a Small Wind Turbine Blade Considering Composite Material and the IEC 61400-2 Standard

Miriam Vázquez ¹, Víctor López ^{1,*}, Rafael Campos ^{2,*}, Erasmo Cadenas ¹ and Paulina Marín ¹

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia 58000, Mexico; 084940@umich.mx (M.V.); ecadenas@umich.mx (E.C.); paulina.marin@umich.mx (P.M.)

² Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca 62490, Mexico

* Correspondence: victor.garza@umich.mx (V.L.); rafael.campos@tecn.mx (R.C.); Tel.: +52-44-33-68-05-86 (R.C.)

Abstract: IEC 61400-2 establishes the Simplified Load Method for designing low-power wind turbine blades without considering dynamic loads in the simplified load methodology. This paper analyzes the load hypotheses established by the standard, also considering the natural frequencies in a 900 W blade. The research methodology begins with the design parameters, the application of the BEM Method, and the use of the QBlade software. Then, the load hypotheses of the standard are defined. Finally, the structural design and the modal and structural analysis of the blade were conducted using FEM-based software. The results show that the minimum participation factors are found on the z-axis and the maximum on the x- and y-axis, and their magnitudes decrease when the natural frequency increases. In general, the principal maximum stresses are located in the middle section of the blade, in the external fiberglass layer, both on the intrados and extrados sides. In conclusion, structural scenarios were established to relate the participation factors of the modal analyses with the load hypotheses. The critical scenarios are at natural frequencies below 280 Hz.

Ciencia Nicolaita 90 ISSN: 2007-7068

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2

Numerical simulation of a 600 W wind turbine blade applying the IEC 61400-2 standard

Paulina Marín Téllez*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Gilberto González Avalos, Gerardo Javier Marín Téllez, Adrián Santibañez Maldonado

Para citar este artículo: Marín Téllez P, López Garza V, Soriano Peña JF, González Avalos G, Marín Téllez GJ, Santibañez Maldonado A (2024). Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2. *Ciencia Nicolaita* 90: 105-116. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.742>

Ciencia Nicolaita 90 ISSN: 2007-7068

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2

Numerical simulation and proposal for structural tests of low-capacity double-root wind turbine blades based on the IEC 61400-2 standard

Adrián Santibañez Maldonado*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Paulina Marín Téllez, Gerardo Javier Marín Téllez

Para citar este artículo: Santibañez Maldonado A, López Garza V, Soriano Peña JF, Marín Téllez P, Marín Téllez GJ (2024). Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2. *Ciencia Nicolaita* 90: 117-126. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.743>

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica	
Título del trabajo	Simulación numérica y ensayos estructurales con dispositivo FishBAC de álabes de una turbina de viento de baja capacidad empleando la norma IEC 61400-2	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Paulina Marin Tellez	paulina.marin@umich.mx
Director	Dr. Víctor López Garza	victor.garza@umich.mx
Codirector	-	-
Coordinador del programa	Dr. Gilberto González Avalos	doc.cs.ingenieria.mecanica@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	Revisar ortografía y mejorar la fluidez de los párrafos.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Traducir de inglés a español algunos términos.
Traducción a otra lengua	No	-
Revisión y corrección de estilo	Sí	Mejorar la gramática, ortografía, coherencia y fluidez.
Análisis de datos	No	-
Búsqueda y organización de información	No	-
Formateo de las referencias bibliográficas	No	-
Generación de contenido multimedia	No	-
Otro	No	-

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Paulina Marin Tellez
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán. 22 de agosto del 2025.

Paulina Marin Tellez

Simulación numérica y ensayos estructurales con dispositivo FishBAC de álabes de una turbina de vien

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:487162029

Fecha de entrega

26 ago 2025, 9:42 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

26 ago 2025, 10:35 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Simulación numérica y ensayos estructurales con dispositivo FishBAC de álabes de una turbina d....pdf

Tamaño del archivo

9.1 MB

176 páginas

32.328 palabras

169.773 caracteres

21% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 21%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
19 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
87 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.