

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**Carrera de Ingeniería Mecánica**



**DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN ÁLABE DE TURBINA  
EÓLICA DE 5 KW A BASE DE MATERIAL  
COMPUESTO CON REFUERZO DE FIBRAS  
NATURALES DE *STIPA OBTUSA***

**STRUCTURAL DESIGN OF A 5 KW WIND TURBINE  
AIRFOIL MADE OF COMPOSITE MATERIAL WITH  
NATURAL FIBERS *STIPA OBTUSA***

Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Mecánica

**Diego Armando Jesús Peña Vicente**

**Código 201410100**

**Asesor**

Samuel Charca

Lima – Perú

Julio 2019

La tesis

**DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN ÁLABE DE TURBINA EOLICA DE 5 KW A  
BASE DE MATERIAL COMPUESTO CON REFUERZO DE FIBRAS  
NATURALES DE *STIPA OBTUSA*.**

Ha sido aprobada

-----

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

-----

[Nombres y apellidos del Asesor de la tesis]

-----

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

*Dedicatoria:*

Le dedico esta Tesis a mi familia, a mi hermana menor Maria Gracia Peña Vicente, mi Madre Jesus Vicente Alcala, mi Padre Jesus Peña Caballero, mi abuela Norma Caballero de Peña, mi abuelo Leonardo Vicente Candela y mi hermana Jacqueline Peña Vicente, a todos mis amigos y familiares por brindarme su apoyo incondicional.

*Agradecimientos:*

Al Dr. Samuel Charca por su apoyo con su investigación “Estudio comparativo del Potencial de Fibras Naturales Endémicas del Perú para su Uso como Refuerzo en Materiales Compuestos Laminados”. Financiado por FONDECYT con contrato 117-2016; para la obtención de las propiedades mecánicas de fibra de *Stipa Obtusa* y por sugerirme este tema de tesis tan interesante, al Ing. Sergio Candiotti por su apoyo con la obtención de propiedades de los laminados compuestos y compañerismo, al Magister Iván Ramos Pérez por sus asesorías. Asimismo, a las personas que contribuyeron a la obtención de las propiedades mecánicas de las fibras naturales y compuestos laminados de *Stipa Obtusa* a lo largo de estos dos años, los cuales hicieron posible la realización de esta tesis.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Turbinas Eólicas.....	1
1.1.1 Clasificación de Turbinas Eólicas .....	1
1.1.1.1 Turbinas de eje horizontal y Turbinas de Eje Vertical .....	1
1.1.1.2 Turbinas a favor del viento y en contra del viento.....	2
1.1.2 Turbinas Eólicas Pequeñas .....	2
1.2 Fundamentos Aerodinámicos de Turbinas .....	4
1.2.1 Área de Barrido de Álabes.....	4
1.2.2 Parámetros de la Energía Eólica.....	5
1.2.3 Límite de Lanchester – Betz .....	6
1.2.4 Relación de velocidad máxima.....	7
1.2.5 Geometría del álabe.....	9
1.3 Aerodinámica y Aeroelasticidad de turbinas Eólicas .....	10
1.3.1 Teoría de momento aerodinámica para una turbina eólica ideal.....	11
1.3.2 El método clásico de la teoría de momento de elemento álabe .....	13
1.4 Materiales Compuestos .....	19
1.4.1 Reforzamientos .....	21
1.4.1.3 Fibras Naturales <i>Stipa Obtusa</i> .....	23
1.4.2 Material de Matriz.....	24
1.4.3 Laminados de material compuesto.....	26
1.5 Mecánica de materiales compuestos.....	28
1.5.1 Micro mecánica de Materiales compuestos .....	29

1.5.2	Macro mecánica de materiales compuestos .....	29
1.5.2.2	Materiales anisotrópicos transversales.....	30
1.5.3	Esfuerzos en Laminados Compuestos .....	32
1.6	Diseño estructural, material y métodos de prueba de álabe de turbina eólica .....	33
1.6.1	Cargas en el álabe.....	33
1.6.2	Criterio de Diseño.....	34
1.6.3	Teoría de viga para álabe de turbina eólica .....	38
1.7	Modelamiento de Álabe de turbina eólica horizontal con FEM .....	49
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA .....</b>	<b>51</b>
2.1	Diseño Conceptual del Álabe de 5kW .....	52
2.1.1	Velocidad del Viento .....	52
2.1.2	Parámetros Geométricos .....	52
2.1.3	Sistema de Referencia .....	53
2.2	Determinación de Disposición de Láminas de Compuesto de <i>Stipa Obtusa</i> .....	54
2.3	Análisis Aerodinámico con BEM.....	55
2.4	Análisis con MATLAB para el Método Teoría de Viga. ....	57
2.5	Análisis Aero elástico con simulación Computacional .....	59
2.5.1	Análisis aerodinámico con ANSYS FLUENT.....	60
2.5.2	Análisis con ANSYS ACP (ANSYS composite Pre) y ANSYS ESTRUCTURAL.....	63
2.6	Validación de diseño final .....	64
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
3.1	Diseño Conceptual del Álabe .....	66
3.1.1	Velocidad del Viento .....	66
3.1.2	Parámetros Geométricos .....	67
3.2	Análisis Aerodinámico con BEM.....	69
3.3	Selección de Material y Disposición de Láminas de Compuestos en el Álabe .....	74
3.4	Análisis analítico con MATLAB Teoría de Viga .....	75

3.5	Análisis Aero elástico con simulación Computacional .....	79
3.5.1	Análisis Aerodinámico con ANSYS FLUENT .....	80
3.5.2	Análisis con ANSYS ACP (ANSYS composite Pre) y ANSYS ESTRUCTURAL .....	86
3.5.3	Validación de Resultados de Calculo Analíticos con Simulación Computacional .....	93
3.5.4	Validación de Diseño Estructural con Normativas Internacionales .....	97
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>107</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>114</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.1</b> Análisis del Ciclo de Vida de impacto Ambiental desde la producción de fibra de vidrio, Fibra de caña China, Resina Epóxica, ABS y Prolipropileno. ....	viii
<b>Tabla 1.2</b> Reducción de Peso en compuestos con fibras naturales.....	xi
<b>Tabla 1.1</b> Especificaciones de Turbinas Eólicas Pequeñas. ....	3
<b>Tabla 1.2</b> Propiedades típicas de fibras inorgánicas.....	21
<b>Tabla 1.3</b> Propiedades mecánicas de fibras naturales. ....	22
<b>Tabla 1.4</b> Propiedades mecánicas de Stipa Obtusa a longitudes de 10, 20, 30 y 40 mm ensayadas a 0.5 mm/min (varianza de ellos resultados entre paréntesis). ....	23
<b>Tabla 1.5</b> Propiedades típicas de matrices termoestables.....	25
<b>Tabla 1.6</b> Propiedades Mecánicas de compuesto laminado de Stipa Obtusa. ....	28
<b>Tabla 1.7</b> Casos de Carga de Diseño.....	35
<b>Tabla 1.8</b> Factores de seguridad Parciales para Materiales. ....	36
<b>Tabla 1.9</b> Factores de seguridad Parciales para Cargas.....	37
<b>Tabla 2.1</b> Parámetros de Diseño del Ábabe.....	53
<b>Tabla 2.2</b> Orientaciones de láminas de compuesto.....	55
<b>Tabla 2.3</b> Los grupos de superficies para simulación computacional de Fluidos. ....	61
<b>Tabla 2.4</b> Parámetros de Malla para simulación de Fluidos.....	61
<b>Tabla 2.5</b> Parámetros de Condiciones de contorno. ....	62
<b>Tabla 2.6</b> Named selection para simulación computacional estructural.....	63
<b>Tabla 2.7</b> Parámetros de Malla para simulación estructural.....	63
<b>Tabla 3.1</b> Perfiles Aerodinámicos a lo largo del ábabe.....	66
<b>Tabla 3.2</b> Distribución de Velocidades de Viento para Casos de Carga.....	67
<b>Tabla 3.3</b> Perfiles Aerodinámicos a lo largo del ábabe.....	68
<b>Tabla 3.4</b> Torque Generado por un Ábabe.....	73
<b>Tabla 3.5</b> Factores de inducción, ángulo de flujo y cargas Aerodinámicas Obtenidas mediante BEM. ....	74

<b>Tabla 3.6</b> Propiedades Orto trópicas del Compuesto laminado de Stipa Obtusa 5 mm. ....	75
<b>Tabla 3.7</b> Distribución de esfuerzos máximos y mínimos en los perfiles Longitudinales. ....	77
<b>Tabla 3.8</b> Valor del Torque Generado mediante Análisis de Fluidos. ....	86
<b>Tabla 3.9</b> Validación de Cargas de Empuje y Arraste en coordenadas globales.....	94
<b>Tabla 3.10</b> Validación de Cargas Aerodinámicas .....	94
<b>Tabla 3.11</b> Validación de Carga Centrípeta. ....	94
<b>Tabla 3.12</b> Validación de Esfuerzos Longitudinales. ....	95
<b>Tabla 3.13</b> Validación de Deflexiones en el álabe. ....	96
<b>Tabla 3.14</b> Esfuerzos Límite de Diseño .....	97
<b>Tabla 3.15</b> Valores de Esfuerzos y Deflexión para casos de carga. ....	98
<b>Tabla 3.16</b> Valores de Esfuerzos y Deflexión para Álabe con 10 mm de espesor. ....	99
<b>Tabla 3.17</b> Distribución de Esfuerzos y Deflexiones en configuraciones en Álabe con Alma integrada. ....	102

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Comparación de álabes de turbina de (a) lino/poliéster y (b) Fibra de Vidrio/Poliéster. .vi	
<b>Figura 1.2</b> Diseño típico de álabes de turbinas eólicas manufacturados como dos cáscaras unidas por juntas adhesivas, integradas por compuesto laminado en la cáscara exterior, una viga tubular fijada al interior de la cáscara.....vii	
<b>Figura 1.3</b> Masa de álabe por unidad de Potencia para diferentes tamaños de turbinas. ....ix	
<b>Figura 1.4</b> Expectativa de cantidad de material de álabe a nivel mundial. ....x	
<b>Figura 1.1</b> Imagen de Turbina Eólica Pequeña con aleta guía. .... 4	
<b>Figura 1.2</b> Representación de Área de Barrido. .... 5	
<b>Figura 1.3</b> Esquema de flujo de aire a través de turbina eólica..... 6	
<b>Figura 1.4</b> Relaciones de Velocidades máximas con respecto al número de álabes. .... 8	
<b>Figura 1.5</b> Forma típica para un álabe..... 9	
<b>Figura 1.6</b> Línea Base de dimensiones de álabe de turbina eólica ..... 10	
<b>Figura 1.7</b> Esquema de flujo de aire a través de Área de Barrido del Álabe..... 12	
<b>Figura 1.8</b> Esquema de turbina eólica con proyección de elemento diferencial “dr” tomado. .... 14	
<b>Figura 1.9</b> Esquema de la sección de un elemento de un álabe de turbina eólica. Las flechas indican los sentidos positivos..... 15	
<b>Figura 1.10</b> Estructura típica de un álabe de turbina eólica. .... 20	
<b>Figura 1.11</b> Niveles de observaciones y tipos de análisis de materiales compuestos. .... 27	
<b>Figura 1.12</b> Material Orto trópico con isotropía transversal. .... 31	
<b>Figura 1.13</b> Sección de un álabe de turbina eólica..... 38	
<b>Figura 1.14</b> Bosquejo esquemático de una sección de un álabe de turbina eólica ..... 39	
<b>Figura 1.15</b> Sección de un álabe mostrando los parámetros estructurales principales..... 40	
<b>Figura 1.16</b> Sección de un álabe. .... 42	
<b>Figura 1.17</b> Álabe de turbina eólica. .... 45	
<b>Figura 1.18</b> Diagrama de cargas con discretización de elementos en viga. .... 45	
<b>Figura 1.19</b> Elemento infinitesimal de una viga ..... 46	

<b>Figura 1.20</b>	Orientación de los Ejes Principales. ....	48
<b>Figura 1.21</b>	Viga en Voladizo discretizada en elementos. ....	49
<b>Figura 1.22</b>	Modelamiento estructural de cáscaras de álabes de turbina eólica. ....	50
<b>Figura 2.1</b>	Diagrama de Flujo de Metodología Utilizada.....	51
<b>Figura 2.2</b>	Sistema de Referencia en coordenadas Globales y locales.....	54
<b>Figura 2.3</b>	Metodología iterativa del método BEM .....	57
<b>Figura 2.4</b>	Metodología del método de viga. ....	58
<b>Figura 2.5</b>	Metodología para análisis Aero elástico con simulación computacional. ....	60
<b>Figura 2.6</b>	Metodología para el diseño de un álabes de Material Compuesto .....	65
<b>Figura 3.1</b>	Distribución de Weibull para velocidades de viento .....	66
<b>Figura 3.2</b>	Distribución de Perfiles Aerodinámicos vista transversal. ....	68
<b>Figura 3.3</b>	Variación de Factor de Inducción Axial con respecto Iteraciones.....	70
<b>Figura 3.4</b>	Variación de Factor de Inducción Tangencial con respecto iteraciones. ....	71
<b>Figura 3.5</b>	Variación de Angulo de Ataque con respecto iteraciones. ....	71
<b>Figura 3.6</b>	Distribución de Cargas de Arrastre en coordenadas globales.....	72
<b>Figura 3.7</b>	Distribución de cargas de Empuje en coordenadas globales. ....	73
<b>Figura 3.8</b>	Distribución de Momentos Flectores a lo largo de los Ejes Principales.....	76
<b>Figura 3.9</b>	Distribución de Esfuerzos Longitudinales en Álabes en MATLAB. ....	76
<b>Figura 3.10</b>	Deflexión del Álabes con respecto al Eje Y .....	78
<b>Figura 3.11</b>	Deflexión del Álabes con respecto al Eje Z .....	78
<b>Figura 3.12</b>	Volumen de Control de Aire para Simulación de Fluidos en SPACECLAIM.....	80
<b>Figura 3.13</b>	Diseño de álabes como superficie en SPACECLAIM. ....	80
<b>Figura 3.14</b>	Volumen de Control de Aire mallado.....	81
<b>Figura 3.15</b>	Detalle de Mallado Local en Sección del Álabes.....	81
<b>Figura 3.16</b>	Detalle de Mallado tipo Inflection.....	82
<b>Figura 3.17</b>	Análisis de convergencia de Malla .....	82
<b>Figura 3.18</b>	Distribución de Flujo de Aire mediante líneas de corriente en planos. ....	83
<b>Figura 3.19</b>	Distribución de Flujo de Aire mediante sobre perfil aerodinámico.....	84
<b>Figura 3.20</b>	Distribución de Flujo de Aire mediante líneas de corriente en el volumen de Control.....	84
<b>Figura 3.21</b>	Distribución de Velocidades tangenciales. ....	85
<b>Figura 3.22</b>	Distribución de Presiones en la superficie de contacto con el fluido.....	85

<b>Figura 3.23</b> Distribución de Presiones en la superficie trasera. ....	86
<b>Figura 3.24</b> Geometría lateral del Alabe mallaado. ....	86
<b>Figura 3.25</b> Geometría Superficial del Álabe mallaado.....	87
<b>Figura 3.26</b> Ejes de coordenadas locales superficiales. ....	87
<b>Figura 3.27</b> Propiedades del compuesto laminado equivalentes de Stipa Ichu Obtusa.....	88
<b>Figura 3.28</b> Distribución de Fibras en lámina de 0° .....	88
<b>Figura 3.29</b> Distribución de Fibras en lámina de 45° .....	88
<b>Figura 3.30</b> Distribución de Fibras en lámina de 90° .....	89
<b>Figura 3.31</b> Módulos de ANSYS utilizados.....	89
<b>Figura 3.32</b> Esfuerzos Longitudinales en la sección del álabe (Perfil aerodinámico N°3). ....	90
<b>Figura 3.33</b> Esfuerzos Longitudinales en la sección del álabe (Perfil aerodinámico N°16). ....	90
<b>Figura 3.34</b> Esfuerzos Longitudinales en la superficie Superior del Álabe. ....	91
<b>Figura 3.35</b> Esfuerzos Longitudinales en la superficie inferior del Álabe. ....	91
<b>Figura 3.36</b> Esfuerzos Equivalentes de VonMises a lo largo del Álabe. ....	92
<b>Figura 3.37</b> Deflexión con respecto al eje Y .....	92
<b>Figura 3.38</b> Deflexión con respecto al eje Z .....	93
<b>Figura 3.39</b> Comparativa de esfuerzos longitudinales en análisis computacional y analítico. ....	96
<b>Figura 3.40</b> Álabe de Turbina eólica con Alma Tubular.....	100
<b>Figura 3.41</b> Mallaado de Álabe con Alma tubular.....	101
<b>Figura 3.42</b> Distribución de Esfuerzos de Von Misses en álabe de turbina con alma de 10 mm. .	102
<b>Figura 3.43</b> Esfuerzos Longitudinales en la superficie superior del álabe.....	103
<b>Figura 3.44</b> Esfuerzos Longitudinales en la superficie inferior del álabe. ....	104
<b>Figura 3.45</b> Deflexión en el eje y del álabe con alma de 16 mm. ....	104
<b>Figura 3.46</b> Deflexión en el eje z del álabe con alma de 16 mm.....	105
<b>Figura 3.47</b> Diseño Final de Álabe de Turbina Eólica hecho a base de Stipa Obtusa vista isométrica. ....	105
<b>Figura 3.48</b> Diseño Final de Álabe de Turbina Eólica hecho a base de Stipa Obtusa sección transversal. ....	106

# INDICE DE ECUACIONES

	Pág.
<b>Ecuación 1</b> Área de Barrido de álabe .....	4
<b>Ecuación 2</b> Coeficiente Energético $C_p$ .....	5
<b>Ecuación 3</b> Energía cinética del viento .....	7
<b>Ecuación 4</b> Velocidades promedio en los álabes.....	7
<b>Ecuación 5</b> Ecuación de Potencia de Salida.....	7
<b>Ecuación 6</b> Factor de Inducción Axial .....	7
<b>Ecuación 7</b> Coeficiente Energético $C_p$ .....	7
<b>Ecuación 8</b> Relación de Velocidad máxima.....	8
<b>Ecuación 9</b> Efecto de Arrastre en el rotor. ....	11
<b>Ecuación 10</b> Ecuación de Bernoulli para diferencia de presiones.....	11
<b>Ecuación 11</b> Potencia aproximada en el rotor .....	12
<b>Ecuación 12</b> Fuerza de arrastre en el rotor .....	12
<b>Ecuación 13</b> Potencia Axial Aproximada en el Rotor.....	13
<b>Ecuación 14</b> Coeficiente de potencia del álabe. ....	13
<b>Ecuación 15</b> Coeficiente de arrastre del álabe.....	13
<b>Ecuación 16</b> Ángulo de ataque.....	15
<b>Ecuación 17</b> Ángulo de flujo de viento .....	15
<b>Ecuación 18</b> Componente diferencial de arrastre en función de componentes aerodinámicos. ....	16
<b>Ecuación 19</b> Componente diferencial de empuje en función de componentes aerodinámicos. ....	16
<b>Ecuación 20</b> Coeficientes de fuerza en el eje y. ....	16
<b>Ecuación 21</b> coeficientes de fuerza en el eje x. ....	16
<b>Ecuación 22</b> Velocidad Relativa del Aire con respecto a la velocidad del Aire. ....	16
<b>Ecuación 23</b> Velocidad relativa del aire respecto a la rotación del Rotor. ....	16
<b>Ecuación 24</b> Factor Adimensional sólido.....	17
<b>Ecuación 25</b> Componente Diferencial arrastre en función de componentes aerodinámicos. ....	17
<b>Ecuación 26</b> Componente Diferencial de Empuje en función de componentes aerodinámicos.....	17

<b>Ecuación 27</b> Factor de Inducción Axial con corrección de factor de Prandtl. ....	18
<b>Ecuación 28</b> Factor de Inducción Tangencial con corrección de factor de Prandtl.....	18
<b>Ecuación 29</b> Factor de Corrección de Prandtl. ....	18
<b>Ecuación 30</b> Factor de inducción axial.....	18
<b>Ecuación 31</b> Relación de factores de inducción tangencial con factores de forma. ....	18
<b>Ecuación 32</b> Factor de inducción axial para altos valores de a. ....	19
<b>Ecuación 33</b> Matriz de Complementos de esfuerzos.....	30
<b>Ecuación 34</b> Matriz de Complementos de Esfuerzos. ....	30
<b>Ecuación 35</b> Matriz de complementos de esfuerzos para un material orto trópico con isotropía transversal. ....	31
<b>Ecuación 36</b> Esfuerzo último según normativa. ....	37
<b>Ecuación 37</b> Rigidez Longitudinal.....	40
<b>Ecuación 38</b> Momento de Rigidez con respecto al eje del rotor X( $X_R$ ). ....	41
<b>Ecuación 39</b> Momento de Rigidez con respecto al eje del rotor Y ( $Y_R$ ). ....	41
<b>Ecuación 40</b> Momento de Rigidez de Inercia con respecto al eje del rotor X( $X_R$ ) ....	41
<b>Ecuación 41</b> Momento de Rigidez de Inercia con respecto al eje del rotor Y( $Y_R$ ) ....	41
<b>Ecuación 42</b> Momento de rigidez centrífugo. ....	42
<b>Ecuación 43</b> Coordenada X de punto elástico.....	42
<b>Ecuación 44</b> Coordenada Y de punto elástico.....	42
<b>Ecuación 45</b> Rigidez por flexión alrededor de las coordenadas universales. ....	43
<b>Ecuación 46</b> Rigidez por flexión alrededor de las coordenadas universales. ....	43
<b>Ecuación 47</b> Momento de rigidez centrífugo alrededor de las coordenadas universales. ....	43
<b>Ecuación 48</b> Ángulo de desfase entre el eje normal del rotor y el eje de la cuerda del álabe. ....	43
<b>Ecuación 49</b> Rigidez por flexión alrededor de los ejes principales de la sección del álabe. ....	43
<b>Ecuación 50</b> Rigidez por flexión alrededor de los ejes principales de la sección del álabe. ....	43
<b>Ecuación 51</b> Relación de Esfuerzo Deformación.....	44
<b>Ecuación 52</b> Deformación en un elemento de sección del álabe.....	44
<b>Ecuación 53</b> Ecuación diferencial de cargas cortantes. ....	45
<b>Ecuación 54</b> Ecuación diferencial de fuerzas de empuje y arrastre. ....	46
<b>Ecuación 55</b> Momentos flectores alrededor de los ejes de coordenadas principales ....	47
<b>Ecuación 56</b> Constantes adimensionales de curvatura ....	47

<b>Ecuación 57</b> Ecuaciones de curvatura alrededor de los ejes principales .....	48
<b>Ecuación 58</b> Ecuaciones diferenciales de Desplazamientos y Rotaciones.....	49

# ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 Tabla de Mediciones de Velocidades en Estación Acobamba, en el Periodo Enero-noviembre 2018 .....	114
Anexo 2 Coordenadas Paramétricas de Perfiles Aerodinámicos. ....	116
Anexo 3 Distribución de Velocidades para cada caso de carga. ....	117
Anexo 4 Propiedades Geométricas e Inerciales de los Perfiles Aerodinámicos. ....	118
Anexo 5 Esfuerzos Longitudinales en Perfiles Aerodinámicos.....	119
Anexo 6 Código de Método Analítico BEM en MATLAB .....	124
Anexo 7 Código de Método Analítico de Teoría de Viga en MATLAB.....	128

## RESUMEN

Cerrar la brecha de servicio de energía eléctrica (20%) en las zonas pobres y alejadas de las zonas rurales es primordial, esto con el objeto de mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas zonas. En la actualidad este servicio se provee gracias a las centrales de generación eléctrica térmicas (gas natural y diésel) e hidráulicas; además de las centrales eólicas instaladas en los últimos años, con lo cual el transporte de energía eléctrica puede ser muy costoso por la localización remota de la población a cubrir. Una alternativa es la implementación de micro-redes de energía eléctrica locales, usando energías no convencionales y renovables como la energía eólica. Por tal motivo en este estudio se propone un diseño de un alabe de una turbina eólica de 5 kW de potencia usando materiales no convencionales. Es importante indicar que el diseño del alabe de turbina eólica se basó en los parámetros de turbinas eólicas existentes en el mercado. Se realizó un análisis computacional validado por métodos analíticos, como el método analítico de BEM y el método de viga para álabes de turbina, considerando las cargas generadas debido al flujo de fluidos en estado estacionario. Para el diseño se consideró como material de refuerzo fibra de *Stipa Obtusa* y como matriz la resina Poliéster. Del análisis se determinó que el espesor adecuado de material compuesto a usar es 5 mm, con un volumen de fracción de refuerzo de 35%.

Los resultados computacionales fueron validados con los resultados analíticos convergiendo en valores similares con un margen de diferencia porcentual de 60 %, siendo aceptable en base a las condiciones establecidas en el análisis computacional. El diseño conceptual inicial no cumplía con los estándares requeridos, por lo cual se implementó unas alas reduciendo la deflexión generada en 90%. El diseño final presenta perfiles aerodinámicos con un espesor de laminado de compuesto de 5 mm y una viga tubular de refuerzo de 16 mm, reduciendo la deflexión a valores de dentro de la normativa, produciendo una potencia oscilante de 1 kW en condiciones nominales y durante las velocidades de viento pico potencia hasta valores de 5 kW.

**Palabras clave:** *Fibras Naturales, Stipa Obtusa, BEM, Aerodinámica, Turbina eólica, Método de Viga.*

## SUMMARY

Reduce the existing gap in energy resources in poor and remote areas is a priority, this with the object of improving life quality of citizens in these areas. Nowadays this service is given by thermic plants (gas and oil) and hydraulic plants, furthermore besides the existing plants in the last years, the transport of energy became really expensive, most of the cases by the localization of remote populations. There is an alternative using micro-grids of local electrical energy resources, using non-conventional and renewable energies as Eolic energy. For this reason, this study proposes a design of a wind turbine blade of 5kW using non-conventional materials. It is important to remark that the design is based on previous designs parameters of similar sizes of wind turbine. It was made a computational analysis validated with an analytic method, considering aerodynamic load on stationary Flow. The design was made of natural fibers using *Stipa Obtusa* and a Polyester Resin; it was established and adequate thickness of the composite material from about 5 mm, with a volume fraction of 35%.

Computational results were validated with the analytics methods, converged into similar values with percentage difference of 60%, this is acceptable by the boundary conditions on the computational analysis. The initial conceptual design, it was added to the blade two souls which gave additional stiffness reducing about 90% of the deflection generated. The final design presents aerodynamic profiles with a composite material of 5 mm. of thickness and a tubular beam of reinforcement of 16 mm., this reduced the deflection to acceptance values for the normative, producing a power of 1 kW in average conditions and 5kW in high velocity conditions.

***Key Workds:*** *Natural Fibers, Stipa Obtusa, BEM, Aerodinamic, Wind Turbine, Beam Method.*

# INTRODUCCIÓN

Las turbinas eólicas de pequeña escala han sido empleadas desde 1973 en el rubro doméstico y de la agricultura. Sin embargo, desde la década de 1990 han incrementado exponencialmente su uso en zonas no conectadas a la red eléctrica, principalmente en países del Norte de Europa. [1] La amplia prevalencia de las turbinas eólicas y el trabajo en conjunto con las redes inteligentes, han permitido la masificación de su uso en la generación distribuida, permitiendo reducir las pérdidas por transmisión, infraestructura más flexible y segura. [2]

En el Perú, se viene utilizando la energía eólica en centrales de generación a gran escala. En el 2018, el aporte del parque eólico alcanzó un total de 1490.38 GWh, representando el 2.9% de la generación total en ese año. Dicho porcentaje fue aportado por los parques eólicos Tres Hermanas (Ica), Cupisnique (La Libertad), Talara (Piura), Marcona (Ica) y Wayra I (Ica) [3]; exhibiendo que aún nos encontramos en vías de desarrollo en este rubro, esto se debe a la existencia de ciertas limitantes para el desarrollo de futuros proyectos eólicos en el Perú, como la falta de mecanismos de promoción que permitan estimular la inversión de este tipo de proyectos y la falta de claridad en la regulación. [4]

En cuanto a la generación eólica a pequeña escala, se han desarrollado proyectos aislados como el desarrollado en la comunidad el Alumbre, en la sierra norte del Perú, en la cual, con apoyo de ONG's ha realizado la instalación de un total de 37 aerogeneradores para cubrir las necesidades básicas. [5] Por otro lado, en el país se encuentra la empresa Waira dedicada a la instalación calefactores solares, así como aerogeneradores en zonas vulnerables del país, habiendo trabajado con comunidades como pescadores Laguna Grande, con quienes han implementado una microrred de paneles solares y turbinas eólicas. [6]. En adición, WindAid es un instituto que promueve proyectos de voluntariado para la construcción de turbinas eólicas pequeñas en comunidades rurales de Trujillo que no tengan

acceso a la electricidad; hasta el momento han desarrollado la instalación de aerogeneradores en comunidades de Playa Blanca, Chocofan, el Chorro y Pacasmayo. [7]

Pese a estas iniciativas, aun no se ha dado una masificación a más hogares peruanos por diferentes motivos. [7] Uno de los principales es el alto costo de la infraestructura eólica. En el mercado actual se ha promovido la comercialización de aerogeneradores con rotores de 1.5 a 5 metros con precios que oscilan entre los US\$1000 y los US\$2500 para usos domésticos, también se encuentran al alcance aerogeneradores con diámetros menores a los 3 metros para generación a menor escala, con precios que oscilan entre precios menores a US\$2500. [4] Por este motivo, es importante el desarrollo de innovaciones que permitan disminuir los costos de manufactura de los aerogeneradores.

Por otra parte, es necesario maximizar los beneficios medio ambientales que proporcionan las turbinas eólicas desde una perspectiva de ciclo de vida. La mayoría de los componentes de las turbinas eólicas como fundaciones, torre, componentes de la caja de cambios y el generador, se reciclan. Sin embargo, los álabes de las turbinas eólicas representan un reto debido a la complejidad de material usado.

Realizando una comparación ecológica entre la fibra de vidrio y fibras naturales, en el proceso de obtención, producción, manufactura y acabado del producto, se tiene que los productos fabricados con fibras de vidrio requieren 83% más energía que las fibras naturales. [8] En adición, los álabes cuentan aproximadamente con un ciclo de vida promedio de 20 a 25 años, una vez cumplido ese periodo de vida útil el material, el cual en la mayoría de los casos es fibra de vidrio o carbono en conjunto con matrices termoestables, es incinerado, reciclado o apilado en vertederos. Usualmente se recurre a incinerarlo, generando gases contaminantes. Debido a esto, es imperativo el desarrollo de nuevas opciones que constituyan procesos industriales con menor daño al medio ambiente. [9] [10]

Por este motivo, la presente tesis busca desarrollar el diseño conceptual de un álabe de una turbina eólica pequeña, tomando como material de fabricación las fibras extraídas de *Stipa Obtusa*, la cual es una fibra natural endémica de la sierra peruana que no tiene carácter de explotación industrial, por lo cual, al utilizarla como objeto de estudio,

impulsará su uso como materia prima, brindando una opción biodegradable y sustentable en comparación con las opciones actuales.

A través de la tesis se validará la resistencia estructural del compuesto a base de fibras de *Stipa Obtusa*, usando métodos analíticos y simulación computacional, frente a las condiciones climáticas del centro poblado Ayahuasán, distrito de Pomacocha, provincia de Acobamba; tomando como criterios límites de diseño las normativas internacionales establecidas.

## **Alcance**

La presente tesis se enfoca en el desarrollo de un diseño conceptual del álabe de turbina eólica a base de fibras extraídas de *Stipa Obtusa*, realizando un análisis analítico y computacional en condiciones de estado estacionario límite, a través del Software ANSYS y Matlab. Así mismo, evaluará la viabilidad técnica de las fibras naturales como materia prima para la fabricación del álabe, tomando como criterio de diseño normas internacionales como la IEC 61400-2.

Es importante precisar que la presente tesis no incluye la manufactura del álabe o la evaluación de costos, sino más bien un diseño conceptual del mismo y validación de la viabilidad del uso de la *Stipa Obtusa* como materia prima para la fabricación de álabes.

## **Antecedentes**

La construcción de álabes de turbinas con fibras naturales se ha realizado en álabes de tamaños pequeños y de tamaños superiores, el último en combinación con las fibras de vidrio o carbono. Dentro de los estudios realizados previamente se encuentra la aplicación de lino, el cual, en comparación con las fibras de vidrio, presenta 10% menos peso, lo cual se traduce en un ahorro del 45% por ciento de fibra. Esto convierte al lino en un adecuado sustituto de la fibra de vidrio para la construcción de álabes, sucumbiendo en ciertos

aspectos ante la fibra de vidrio, pero cumpliendo con los requisitos de integridad estructural para una turbina de 11 kW. [8] [11]



**Figura 1.1** Comparación de álabes de turbina de (a) lino/poliéster y (b) Fibra de Vidrio/Poliéster.  
Fuente: Darshil.U, Shah, Peter J. Schubel\*, Mike J. Cliffrod, Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine Blade case study [11]

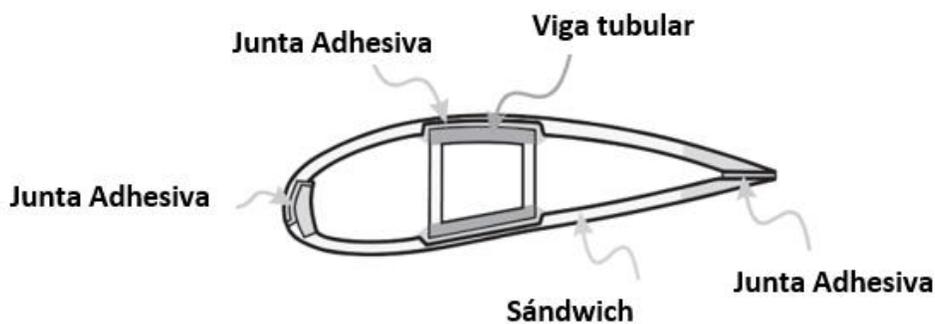
También se ha utilizado el uso de compuestos basados en bambú, el cual, debido a su alta resistencia, puede ser aplicado en turbinas de grandes dimensiones. Su baja densidad y gran adaptabilidad con fibras de carbono, lo hace muy atractivo como material sostenible para la fabricación de alabes. Además, permite en combinación con otros materiales, obtener un bajo costo de fabricación y altos valores de resistencia a la tracción como laminado, realizando un buen desempeño estructural. Actualmente es una de las soluciones más viables para la reducir la brecha del reciclaje de los álabes de turbina. [12]

Para la presente tesis se espera utilizar las fibras extraídas de *Stipa Obtusa*, cuyo nombre común es ichu. Actualmente, se están realizando diferentes investigaciones financiadas por CONCYTEC sobre la caracterización de las propiedades mecánicas y químicas de esta fibra. Se han realizado estudios de la aplicación de la fibra de *StipaObtusa* en prótesis, skates, tablas de surf y trabajos de investigación referentes a tratamientos para la obtención de sus propiedades mecánicas y químicas. Sin embargo, no existe evidencia de trabajos de investigación o aplicaciones previas con referencia a las mencionadas.

## Justificación y motivación

Entre los elementos que constituyen el aerogenerador, uno de los más importantes es el álabe, el cual es un elemento mecánico encargado de transformar la energía cinética del aire en energía mecánica rotacional para posteriormente convertirlo en energía eléctrica. [13]

Los materiales compuestos, son el material base utilizado para la manufactura de los álabes de turbina. Los componentes principales del álabe son: La carcasa, que está hecha a base de matriz polimérica con insertos de fibras; una estructura de sándwich, hecha a base de compuestos laminados y la viga tubular, la cual es construida a base de fibra de vidrio o fibra de carbono. [13] En la **Figura 1.2** se muestran estos componentes.



**Figura 1.2** Diseño típico de álabes de turbinas eólicas manufacturados como dos cáscaras unidas por juntas adhesivas, integradas por compuesto laminado en la cáscara exterior, una viga tubular fijada al interior de la cáscara.

Fuente: W. Tong, Wind Power Generation and wind design. [13]

Los materiales utilizados para la manufactura de álabes de turbina eólica deben poseer baja densidad, alta resistencia y tolerancia al daño. [13] Sin embargo, la razón principal de utilizar material compuesto son sus propiedades mecánicas ante la fatiga y su facilidad para moldear geometrías complejas.

La mayoría de los álabes de turbinas eólicas se fabrican a base de material compuesto de polímero con refuerzo de fibras de vidrio y algunos tienden a realizar otras combinaciones como refuerzo de fibras de carbono o una mezcla híbrida entre fibras de

vidrio y fibras de carbono. Para la construcción de turbinas pequeñas se han utilizado materiales de fibras naturales como cáñamo, lino y otros materiales a base de celulosa. [14]

El uso de fibras naturales reduce la dependencia de recursos y materiales sintéticos (cerámicos, plásticos), las emisiones de contaminantes, las emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de materiales no biodegradables. En la **Tabla 1.1** se realiza la comparación del ciclo de vida del impacto ambiental entre la fibra de vidrio con respecto a la Fibra natural de caña China, la cual presenta grandes ventajas competitivas. [15] Asimismo, la manufactura de los materiales utilizados en los álabes, constan de ciertos procesos con altos índices de impacto ambiental negativos, como se puede apreciar en la tabla a continuación. [15]

<b>Impacto Ambiental</b>	Fibra de Vidrio	Fibra de caña China	Resina Epóxica	ABS	Polipropileno
<b>Energía Usada (MJ/kg)</b>	48.33	3.64	140.71	95.02	77.19
<b>Emisiones de Dióxido de Carbono (kg/kg).</b>	2.04	0.66	5.90	3.10	1.85
<b>Emisiones de Óxido de Carbono (g/kg)</b>	0.80	0.44	2.20	3.80	0.72
<b>Emisiones de SOx (g/ kg)</b>	8.79	1.23	19.00	10.00	12.94
<b>Emisiones de NOx (g/ kg)</b>	2.93	1.07	35.00	11.00	9.57

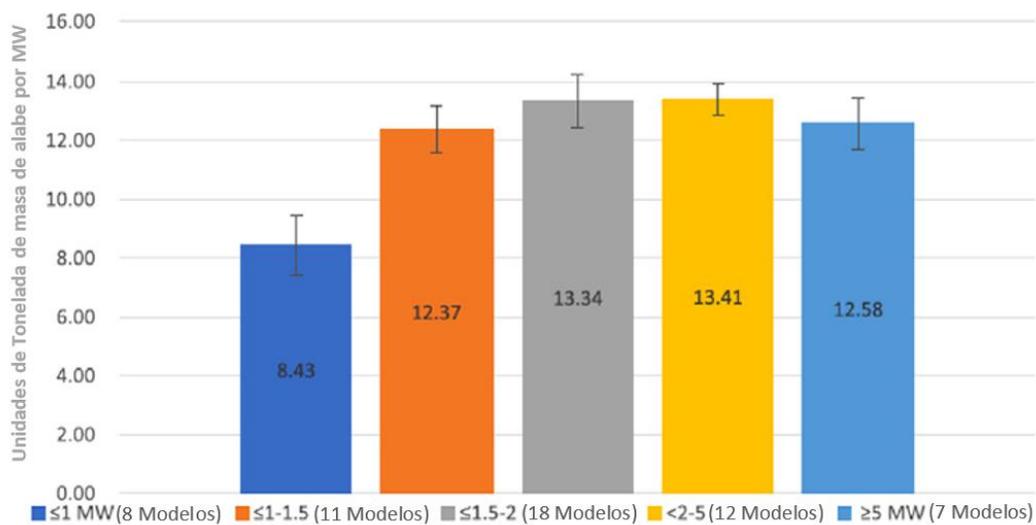
**Tabla 1.1** Análisis del Ciclo de Vida de impacto Ambiental desde la producción de fibra de vidrio, Fibra de caña China, Resina Epóxica, ABS y Prolipropileno.

Fuente: S. V Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty and S.Arora, Are natural fiber composite environmentally superior to glass fiber reinforced composites? [15].

Bajo las condiciones establecidas anteriormente se puede observar que la producción de fibras de vidrio presenta la generación de altos contaminantes de sulfatos y nitratos, esto es un indicador de las ventajas que presentan las fibras naturales sobre las fibras de vidrio. [15]

Complementando lo mencionado, el desmantelamiento de los álabes de las turbinas eólicas, las cuales tienen un tiempo de vida útil de 20 a 25 años, tiene índices de

contaminación ambiental a través de la generación de desechos materiales. Como se observa en la **Figura 1.3**, para la producción de 1 MW de potencia eléctrica instalado, se requiere aproximadamente de 12 a 15 toneladas de fibra de vidrio por MW instalado, dependiendo del tamaño de la turbina a instalar. En base a esta estimación, en la **Figura 1.4** se presenta una proyección al año 2030 de la cantidad de material que se utilizaría para la fabricación de los álabes de turbinas eólicas a nivel mundial, llegando a obtener valores de 300 000 toneladas, las cuales se tendrían que reciclar anualmente en cierto punto, generando una increíble cantidad de desechos sólidos.



**Figura 1.3** Masa de álabes por unidad de Potencia para diferentes tamaños de turbinas.

Fuente: J.P. Jensen and K. Skelton, Wind turbine Blade recycling. Experiences, challenges and possibilities in a circular economy [10].



**Figura 1.4** Expectativa de cantidad de material de álabes a nivel mundial.

Fuente: J.P. Jensen and K. Skelton, Wind turbine Blade recycling. Experiences, challenges and possibilities in a circular economy [10].

Cabe resaltar que, en la mayoría de los casos, solo el 30% de la fibra de refuerzo utilizada puede reusarse para formar nuevas fibras. Pese a los esfuerzos desarrollados en los últimos años referentes a la reutilización del material, se han desarrollado estudios a través de los cuales se reduce el porcentaje de material desperdiciado como reciclar el material compuesto de los álabes de turbina, diseñar los álabes en función de su vida útil y su reutilización como refuerzo en materiales como el concreto. El material restante se desecha con métodos tradicionales de incineración, los cuales dejan un 60% de material en forma de ceniza que se puede reutilizar en construcción o en los casos que la ley prohíba su reutilización, se recurre al almacenamiento del material desechado. [9] [10]

Por otra parte, la manufactura de componentes industriales a gran escala deja una diferencia muy marcada con respecto a los materiales compuestos a base de fibras naturales. En la **Tabla 1.2** se detallan las ventajas que presentan los compuestos de cáñamo con resina epóxica, cáñamo con resina de polipropileno y fibra de caña china con resina de polipropileno con respecto al material compuesto con fibras cerámicas en la fabricación de

un panel lateral de un auto Audi A3, un componente aislador para un carro Ford y una paleta de transporte de carga. [15]

<b>Componentes</b>	Materiales compuestos convencionales	Peso de componentes de referencia (g)	Material Refuerzo de Fibras Naturales	Peso de componentes a base de Refuerzo de Fibras Naturales (g)	Reducción de Peso (%)
<b>Panel lateral Auto</b>	ABS	1125	Cáñamo-Epóxico	820	27
<b>Aislador de Automóvil</b>	Fibra de Vidrio-Polipropileno	3500	Cáñamo-Polipropileno	2600	26
<b>Paleta de Transporte</b>	Fibra de Vidrio – Polipropileno	15,000	Fibra de caña China – Polipropileno	11,770	22

**Tabla 1.2** Reducción de Peso en compuestos con fibras naturales.

Fuente: S. V Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty and S.Arora, Are natural fiber composite environmentally superior to glass fiber reinforced composites? [15]

En adición a esto, el uso de fibras naturales reduce el porcentaje de desechos al ser un material natural. En un estudio comparativo entre las fibras naturales y la fibra de vidrio se esclarece que las fibras de vidrio en el ámbito técnico presentan características similares o superiores frente a las fibras naturales. Sin embargo, las fibras naturales presentan características ecológicas superiores a las fibras de vidrio, al ser menos tóxicas, poseer menor energía consumida para producción de electricidad y lo más relevante, las fibras naturales son biodegradables en comparación con las fibras sintéticas, que tienen periodos de degradación prolongados. [11]

El uso de fibras naturales en la fabricación de álabes de turbina eólica es una aplicación planteada previamente en turbinas de pequeñas dimensiones. Por lo tanto, la configuración planteada en la presente tesis se encuentra dentro de los parámetros de diseño existentes ya establecidos. Adicionando como aporte el uso de una especie de fibras naturales no implementada en este campo previamente. [15]

Por último, la presente tesis se alinea con los objetivos de sostenibilidad de las empresas de generación eléctrica, pues propone el uso de turbinas en un entorno no contaminante, tomando en consideración no solo el criterio de diseño desde el punto de vista operativo, sino la manufactura, instalación, operación, desmantelamiento y el material base de fabricación, de las turbinas. El uso de fibras naturales en el proceso de manufactura es una alternativa real para el desarrollo tecnológico sostenible, rentable y no contaminante; reduciendo la brecha de desechos al final del ciclo de vida útil de los álabes optando por materiales bio-degradables. Así, como la generación de una nueva aplicación para el uso de las plantas endémicas nativas del Perú. [10]

## **Objetivo general**

La presente tesis busca evaluar el diseño estructural de un álabe de turbina eólica de 5 kW, usando materiales compuestos a base de fibras extraídas de *Stipa Obtusa* y matriz polimérica.

## **Objetivos específicos**

- Realizar el diseño conceptual del álabe para una turbina eólica pequeña de 5kW.
- Realizar el análisis aerodinámico del modelo del álabe utilizando el método “Blade element Momentum (BEM) y el análisis analítico Aero elástico del comportamiento de las propiedades mecánicas del álabe de turbina eólica utilizando el método de Viga, considerando la disposición de los laminados de compuesto.
- Ejecutar el análisis Aero elástico utilizando simulación computacional en condiciones estacionarias para validar el comportamiento de las propiedades mecánicas del álabe de turbina eólica
- Validar el diseño final con los límites establecidos en los estándares internacionales para el diseño de turbinas eólicas pequeñas.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Turbinas Eólicas

En la actualidad el uso de aerogeneradores para brindar construcciones sostenibles, ha permitido el desarrollo de mayores aplicaciones urbanas de aerogeneradores. [16] Las turbinas eólicas se pueden clasificar de acuerdo al tipo de configuración que presentan como el tipo de flujo de aire relativo con respecto a la turbina del rotor, la capacidad de la turbina, el tipo de manejo del generador, el modo de alimentación eléctrica y la locación de la turbina instalada. [13]

#### 1.1.1 Clasificación de Turbinas Eólicas

##### 1.1.1.1 Turbinas de eje horizontal y Turbinas de Eje Vertical

En las turbinas modernas se puede clasificar la configuración de eje rotativo con orientación vertical u horizontal. Las turbinas eólicas más comerciales son de tipo horizontal, en las cuales el flujo de aire se encuentra paralelo al eje de rotación del rotor. Las ventajas de este tipo de turbina incluyen alta eficiencia, alta energía, baja disminución de la velocidad del aire y un costo menor por unidad de energía producida. [13]

En el caso de las turbinas verticales, su giro se produce perpendicular al suelo. Una de las ventajas de este tipo de configuración es el funcionamiento a través de distintos flujos de aire en cualquier dirección, evitando la implementación de un sistema de control. Asimismo, dado que el generador, caja de cambios y otros componentes se pueden instalar en el suelo, se simplifica significativamente la construcción, reduciendo el costo de fabricación de la misma turbina. Las desventajas son: necesita de una fuente externa para poder iniciar su rotación y la turbina se encuentra fijada a una distancia considerable del suelo, por lo que su capacidad de producción es limitada. Bajo estas premisas, el empleo de turbinas eólicas verticales es mucho menor con respecto a las horizontales. [13]

### **1.1.1.2 Turbinas a favor del viento y en contra del viento**

Estas clasificaciones se basan en la configuración del rotor de la turbina con respecto a la dirección del flujo de aire. En su mayoría, las turbinas eólicas son desarrolladas a favor del viento, en estos casos el rotor se encuentra del lado incidente del flujo de aire. La mayor ventaja de este diseño es que evita la distorsión del campo de flujo del aire al pasar a través de la torre y la góndola.

En una turbina en contra del viento, el flujo de aire impacta primero en la góndola y la torre, para posteriormente impactar en los álabes de la misma. Esto genera cierta distorsión en el flujo del aire generando grandes fluctuaciones en la generación de energía. [13]

### **1.1.2 Turbinas Eólicas Pequeñas**

Las turbinas eólicas pequeñas se definen según el estándar internacional como las turbinas con un área de barrido menor a  $200 \text{ m}^2$ . Esto corresponde a una potencia promedio de una turbina de 50 kW. La velocidad de rotación es superior a la de los aerogeneradores grandes, debido a su menor tamaño sometido a condiciones de operación caóticas presentes en el ambiente que se instalan. [17] Se diseñan usualmente con una cola con forma de aleta, la cual les permite girar en la dirección que llega el viento para una mejor captación de la energía cinética del aire. [18]

La localización de turbinas pequeñas se da comúnmente en lugares cercanos al lugar en donde se suministra energía. Usualmente los lugares suministrados son casas, villas, ciudades pobladas en regiones donde la velocidad del aire es baja o moderada. [18] [19] La aplicación de turbinas eólicas verticales en ambientes urbanos predominan, debido a su óptima captación de energía multidireccional, pese a ello las turbinas eólicas horizontales presentan mayores ventajas económicas. [16]

Las turbinas eólicas operan a números de Reynolds bajos, lo cual es bueno porque evitan la generación de turbulencia en el contorno de la capa límite en los álabes. Sin embargo, esto genera consecuencias en las turbinas eólicas como una caída en la relación empuje – arrastre, la cual es primordial para la extracción de energía del aire. En los

diseños se desea encontrar la relación de empuje – arrastre óptimo, la cual conlleva a un torque alto y por lo tanto mayor extracción de energía. [19]

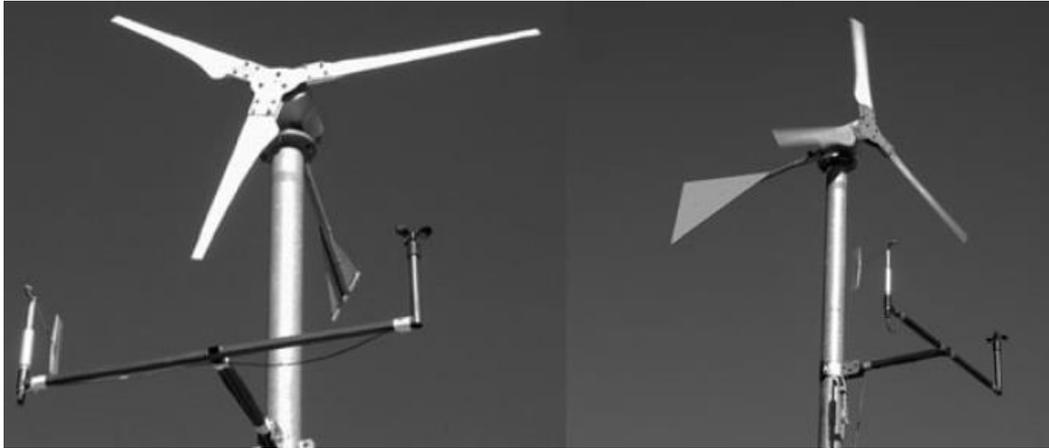
Asimismo, según estudios el espesor de los perfiles de los álabes debe tener un 5% de longitud de la cuerda y cerca del punto de fijación al rotor presentar un 25 % de la longitud de la cuerda para mantener la relación empuje – arrastre óptimo, esto a su vez sería viable dependiendo de la rigidez que presentarían las aspas en estas condiciones, por lo cual se requiere realizar un análisis estructural para determinar las características deseadas. [18] En la **Tabla 1.1** se puede apreciar un grupo de turbinas eólicas en el mercado actual y sus especificaciones técnicas. [20] Las cuales servirán como base para establecer el perfil aerodinámico de la turbina analizar.

	<b>Fortis Mont.</b>	<b>Fortis Passat</b>	<b>Airdolphin</b>	<b>Ampair</b>	<b>Swift</b>	<b>Turby</b>
<b>Tipo de Turbina</b>	HAWT	HAWT	HAWT	HAWT	HAWT	VAWT
<b>Número de Álabes</b>	3	3	3	3	5	3
<b>Diámetro del rotor [m]</b>	5	3.12	1.8	1.7	2.08	2
<b>Área de barrido [m<sup>2</sup>]</b>	19.64	7.65	2.54	2.27	3.40	5.3
<b>Potencia Nominal [kW]</b>	5.8	1.4	1	0.6	1.5	2.5
<b>Velocidad de Viento Nominal [m/s]*</b>	17	16	12.5	12.6	12	14
<b>Velocidad de Viento de Corte de entrada [m/s]</b>	2.5	3	2.5	3.6	3.4	4.0
<b>Velocidad de Viento de Corte de salida [m/s]</b>	n/a	n/a	50	n/a	n/a	14
<b>Potencia de Salida [kW]</b>	4	1	1	0.6	1.5	1.6
<b>Coefficiente de Potencia Calculado [%]</b>	18.9	12.1	36.4	24.5	40.9	28.5

Nota: \*Valores a velocidad del viento de 12 m/s

**Tabla 1.1** Especificaciones de Turbinas Eólicas Pequeñas.

Fuente: Samuel O. Ani. Comparison of Energy Yield of Small Wind Turbines in Low Wind Speed Áreas. [20]



**Figura 1.1** Imagen de Turbina Eólica Pequeña con aleta guía.  
Fuente: David Wood. Small Wind Turbines [18]

En los últimos años se han desarrollado estudios referentes a turbinas eólicas pequeñas a manera de hacerlas más accesibles para un público específico de baja demanda eléctrica. Los temas de estudio se pueden resumir en dos categorías: Aerodinámica y análisis estructural, siendo la segunda categoría materia del presente estudio. [21]

Tomando esto en consideración, se tiene que establecer ciertos parámetros como el diseño aerodinámico del álabe, relación de velocidad máxima, número de álabes, material de manufactura, [22] los cuales se detallan en las siguientes secciones.

## 1.2 Fundamentos Aerodinámicos de Turbinas

### 1.2.1 Área de Barrido de Álabes

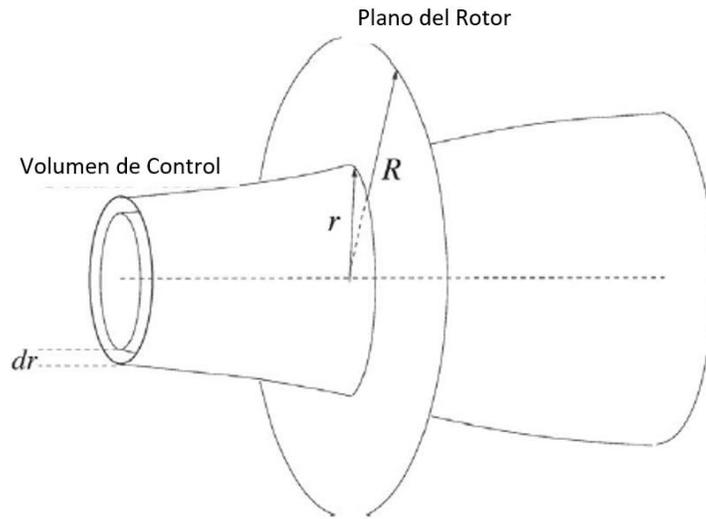
El área de barrido de los álabes es un primer concepto idealizado para determinar ciertos valores de la energía utilizar. Se establece en base a la siguiente fórmula [13]:

$$A = \pi[(l + r)^2 - r^2] = \pi l(l + 2r)$$

**Ecuación 1** Área de Barrido de álabe

Donde  $l$  es la longitud de los álabes expresada en metros y  $r$  es el radio del eje expresado en metros. Entonces duplicando la longitud de los álabes, el área de barrido puede incrementarse hasta un factor de 4:

$$l \gg 2r, A \approx \pi l^2. [13]$$



**Figura 1.2** Representación de Área de Barrido.  
Fuente: Martín O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

### 1.2.2 Parámetros de la Energía Eólica

La conversión de energía eólica en energía eléctrica establece que la energía del viento es convertida en energía mecánica, la cual proporciona el movimiento al eje del rotor del aerogenerador. Los agentes de conversión de esta energía son los álabes. Para maximizar la cantidad de energía capturada, los álabes de la turbina deben ser diseñados lo más eficientemente posible [13] [24].

El coeficiente energético  $C_p$  determina la eficiencia de conversión en el proceso señalado previamente, definiéndolo como una relación de la energía mecánica capturada por los álabes con respecto a la energía del viento [13]:

$$C_p = \frac{P_{me,out}}{P_w} = \frac{P_{me out}}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho A \bar{u}^3}$$

**Ecuación 2** Coeficiente Energético  $C_p$

Donde:

$A$ = Área de Barrido( $m^2$ ).

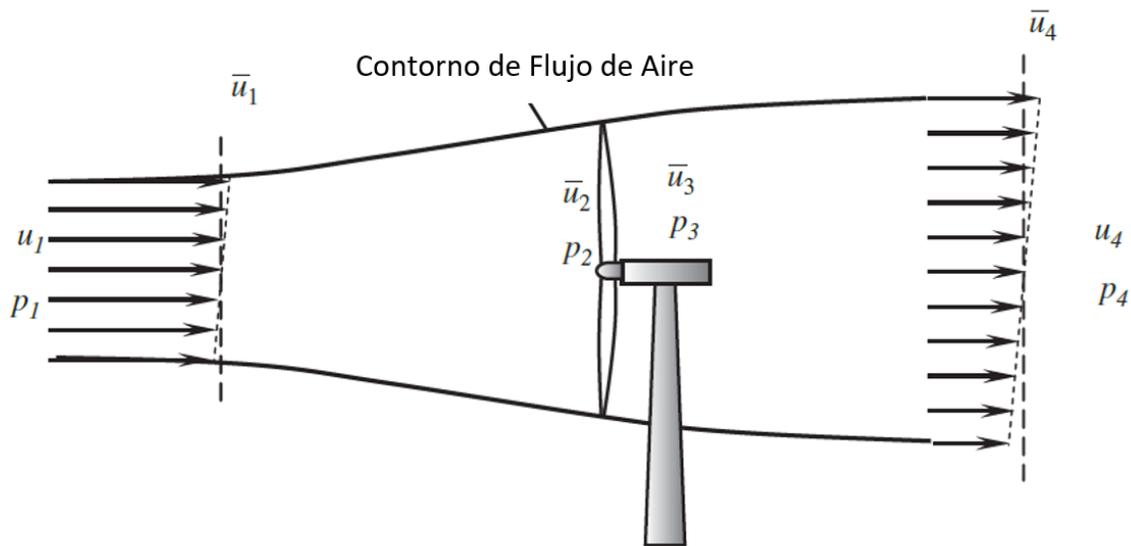
$\rho$  = Densidad del Aire( $m^3/kg$ ).

$u$ = Velocidad del aire en el rotor( $m/s$ ).

Debido a que hay varias pérdidas aerodinámicas en el sistema de una turbina eólica el coeficiente energético es generalmente menor al límite teórico establecido, usualmente se encuentra en el rango de 30 a 45% para todo tipo de turbinas. [13] [24]

### 1.2.3 Límite de Lanchester – Betz

La máxima eficiencia teórica de una turbina eólica ideal fue desarrollada por Lanchester y Betz. Este límite establece que las turbo máquinas no podían convertir más de  $16/27$  (59.26%) de la energía cinética del viento en energía mecánica. Como se muestra en la **Figura 1.3**,  $\bar{u}_1$  y  $\bar{u}_4$  son velocidades promedio localizadas a una distancia severa de la turbina eólica; mientras que  $\bar{u}_2$  y  $\bar{u}_3$  son velocidades promedio al frente y a la espalda de los álabes rotativos.



**Figura 1.3** Esquema de flujo de aire a través de turbina eólica.  
Fuente: W.Tong. Wind Power Generation [13]

Se asume que no hay variación de velocidad a través de los álabes de la turbina y que las presiones de la corriente de aire lejos de la turbina ( $p_1$ ) y ( $p_4$ ) son los valores de presión estática iguales, existiendo una diferencia de presiones ( $p_2$ ) y ( $p_3$ ) al frente y a la

espalda de los álabes; por lo que, la energía cinética del viento se puede derivar de la siguiente manera [13]:

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2} \rho (\bar{u}_1^2 - \bar{u}_4^2)$$

**Ecuación 3** Energía cinética del viento

$$\bar{u}_2 = \bar{u}_3 = \frac{1}{2} (\bar{u}_1 + \bar{u}_4)$$

**Ecuación 4** Velocidades promedio en los álabes

Dando como resultado la potencia generada por el movimiento mecánico de los álabes a través de la siguiente ecuación:

$$P_{me,out} = \frac{1}{2} \rho A \bar{u}_2 (\bar{u}_1^2 - \bar{u}_4^2) = \frac{1}{2} \rho A \bar{u}_1^3 4a(1-a)^2$$

**Ecuación 5** Ecuación de Potencia de Salida

Donde  $a$  es el factor de inducción axial definido de la siguiente manera:

$$a = \frac{\bar{u}_1 - \bar{u}_2}{\bar{u}_1}$$

**Ecuación 6** Factor de Inducción Axial

Sustituyendo ambas ecuaciones en la ecuación del coeficiente energético y asumiendo que  $\bar{u}_1 = \bar{u}$ , se tiene:

$$C_p = 4a(1-a)^2$$

**Ecuación 7** Coeficiente Energético  $C_p$

Esto indica que el coeficiente energético es una función del factor de inducción axial, determinando que el máximo coeficiente energético es 16/27 cuando  $a = 1/3$  [25].

#### 1.2.4 Relación de velocidad máxima

La relación de velocidad es definida como la velocidad relativa del viento con respecto a la velocidad del rotor como se expresa en la **Ecuación 8**. Este aspecto es muy importante en el diseño de álabes y la propia turbina; una alta relación de velocidad

máxima demanda reducir el ancho de las secciones, para estrechar los perfiles de la cuchilla, reduciendo el material utilizado. Sin embargo, incrementa las fuerzas aerodinámicas y centrífugas. El ruido también es asociado con relaciones de velocidades altas. Actualmente las turbinas utilizan una relación de velocidad de 6 a 9 para turbinas con 3 álabes.

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_o}$$

**Ecuación 8** Relación de Velocidad máxima

Fuente: Peter J. Schubel and Richard J.Crossley, Wind Turbine Blade Design [26]

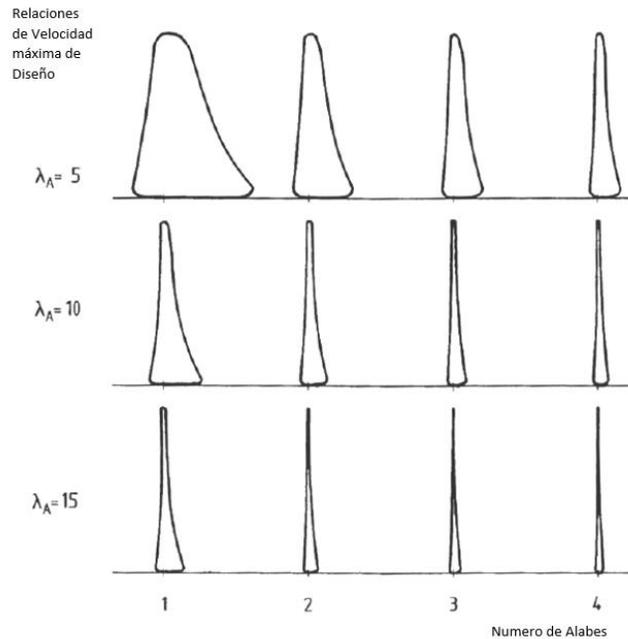
Donde:

$V_o$  = velocidad del viento (m/s)

$\Omega$  velocidad rotacional del rotor (rad/s)

$r$  = radio del roto  $r$  (m)

En la **Figura 1.4** se puede apreciar las variaciones del diseño del álabe con respecto a la variación de la relación máxima de velocidad. [26]

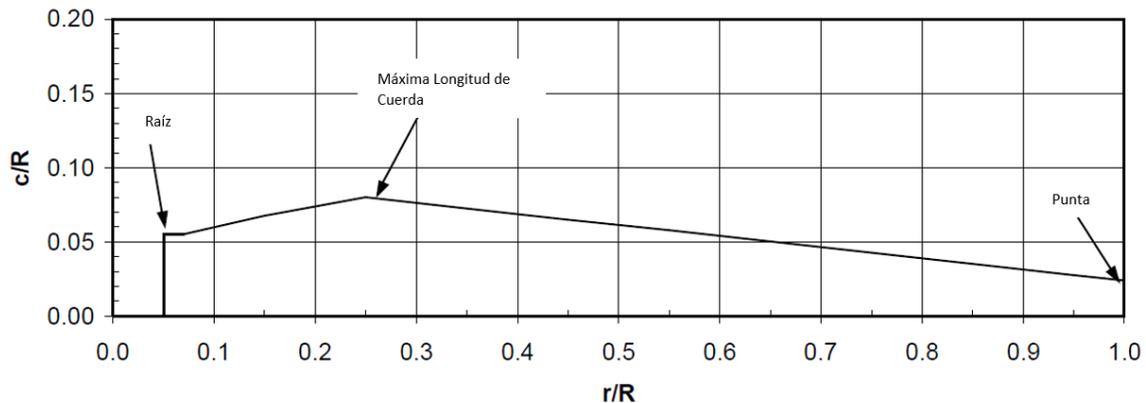


**Figura 1.4** Relaciones de Velocidades máximas con respecto al número de álabes.

Fuente: Peter J. Schubel and Richard J.Crossley. Wind Turbine Blade Design [26]

### 1.2.5 Geometría del álabe

La forma del álabe está constituida por un punto inicial fijado al rotor de la turbina eólica. El álabe presenta un punto de ancho máximo (25%  $r/R$ ), el cual se encuentra cercano al punto fijado al rotor. El modelo definido varía conforme estudios realizados por instituciones o parámetros establecidos por los fabricantes. [27]

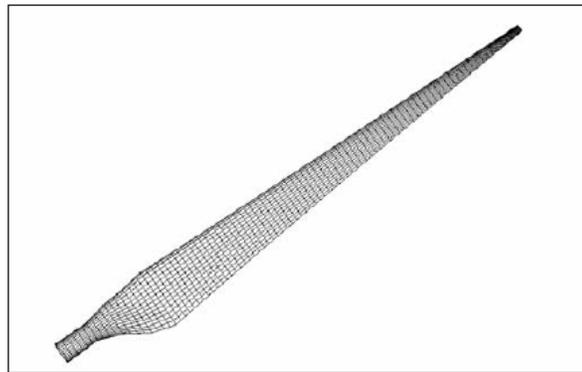


**Figura 1.5** Forma típica para un álabe.

Fuente: Dayton A.Griffin. Blade System Design Studies Volume I [27]

El perfil aerodinámico geométrico es un factor muy importante para el desempeño de la turbina. El álabe a lo largo del mismo presenta una variación con respecto a los perfiles que presenta, esto con el fin de proporcionar mayor rigidez en puntos que lo requieran, así como un mayor arrastre y empuje. En la selección del perfil aerodinámico usualmente se suele utilizar 3 perfiles, el punto donde se produce el cambio de sección varía con respecto a los diseños planteados. En la **Figura 1.6** se puede apreciar un ejemplo de selección de dimensiones para un álabe de turbina de 9 metros. [28]

POSICIÓN	%R	CUERDA	ANGULO DE DISEÑO
200	9.4%	0.356	29.6
600	13.5%	0.338	24.8
1000	17.6%	0.569	20.8
1400	21.7%	0.860	17.5
1800	25.8%	1.033	14.7
2200	30.0%	0.969	12.4
3200	40.3%	0.833	8.3
4200	50.6%	0.705	5.8
5200	60.9%	0.582	4.0
6200	71.2%	0.463	2.7
7200	81.5%	0.346	1.4
8200	91.8%	0.232	0.4
9000	100.0%	0.120	0.0



**Figura 1.6** Línea Base de dimensiones de álabe de turbina eólica

Fuente: Derek Berry. Designo f 9- Meter Carbon-Fiberglass Prototype Blades: CX-100 and TX-100. [28]

### 1.3 Aerodinámica y Aeroelasticidad de turbinas Eólicas

A continuación, se explicarán los principios aerodinámicos sobre los cuales se han sentado las bases para explicar el comportamiento de turbinas eólicas. En la mayoría de las teorías establecidas se determina el flujo de aire aproximadamente estacionario, omitiendo la turbulencia como una rápida variación arriba de 1Hz y omitiendo la variación diurna.

Las evaluaciones de los coeficientes de potencia de una turbina eólica se han evaluado en base a distintos modelos como el método de vórtice, el método de paneles y el método de clásico de momento de un álabe (BEM). Este último es uno de los más

utilizados para la determinación de los coeficientes, su evaluación se realiza mediante simulación computacional, la cual se explica con mayor énfasis en los acápites siguientes.

### 1.3.1 Teoría de momento aerodinámica para una turbina eólica ideal

El concepto más idealizado del comportamiento aerodinámico de una turbina eólica es el de una dimensión, en el cual se asume que las rotaciones del rotor con sus componentes carecen de fricción y no hay una componente de velocidad rotacional. Esta teoría en resumen comprende el comportamiento del flujo de aire que pasa a través del rotor, el cual pierde velocidad al interactuar con el área de barrido de la turbina eólica, pasando de una velocidad  $V_0$  a  $u_1$ . Estas diferencias de velocidades tienden a generar dos efectos en el rotor: Un arrastre ( $T$ ) y una potencia absorbida por el eje del rotor( $P$ ). [23].

$$T = \Delta p A_b$$

**Ecuación 9** Efecto de Arrastre en el rotor.

*Donde:*

$A_b$  = Área de barrido de la turbina ( $m^2$ ).

$\Delta p$  = diferencia de presiones en el rotor ( $Pa$ ).

El flujo de aire se considera como estacionario, incomprensible, sin fricción y ninguna fuerza externa actúa sobre el fluido. De esta manera, aplicando la ecuación de Bernoulli determinamos que la diferencia de presiones ( $\Delta p$ ) es igual a: [23]

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2)$$

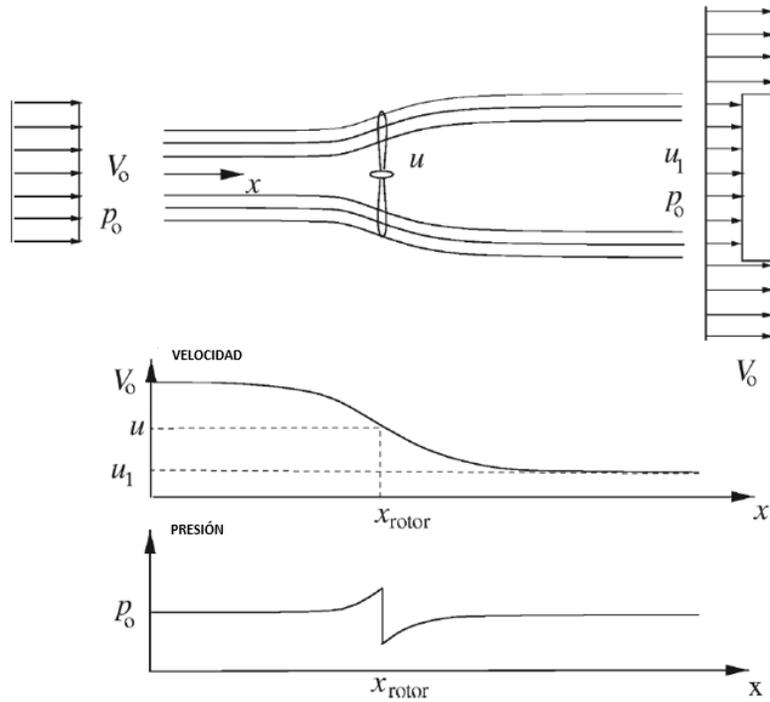
**Ecuación 10** Ecuación de Bernoulli para diferencia de presiones.

*Donde:*

$\Delta p$  = diferencia de presiones en el rotor ( $Pa$ ).

$V_0$  = Velocidad del viento ( $m/s$ ).

$u_1$  = velocidad posterior a las aspas del rotor ( $m/s$ ).



**Figura 1.7** Esquema de flujo de aire a través de Área de Barrido del Álabes.  
Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

Realizando las ecuaciones de conservación de masa y momento, se simplifican ciertas expresiones que permiten determinar la **Ecuación 11** de potencia aproximada y la **Ecuación 12** de fuerza de arrastre que presenta la turbina eólica [23].

$$P = 2\rho V_0^3 a(1 - a)^2 A$$

**Ecuación 11** Potencia aproximada en el rotor

$$T = 2\rho V_0^2 a(1 - a)^2 A$$

**Ecuación 12** Fuerza de arrastre en el rotor

Donde:

$V_0$  = Velocidad del viento (m/s).

$a$  = Factor de inducción axial.

$A$  = Área de barrido de la turbina ( $m^2$ ).

$\rho$  = Densidad del aire ( $m^3/kg$ ).

La potencia disponible en la sección transversal (*Paxial*) es igual al área de barrido del rotor:

$$P_{axial} = \frac{1}{2} \rho A V_0^3$$

**Ecuación 13** Potencia Axial Aproximada en el Rotor.

Reemplazando las expresiones obtenidas por la conservación de energía en conjunto con la potencia disponible por la turbina, se obtienen los coeficientes de arrastre ( $C_T$ ) y potencia ( $C_p$ ), los cuales son los indicadores principales para el diseño de una turbina eólica. Estos coeficientes como se muestran en la **Ecuación 14** y **Ecuación 15**, dependen directamente del factor de inducción “a”. [23]

$$C_p = 4a(1 - a)^2$$

**Ecuación 14** Coeficiente de potencia del álabe.

$$C_T = 4a(1 - a)$$

**Ecuación 15** Coeficiente de arrastre del álabe

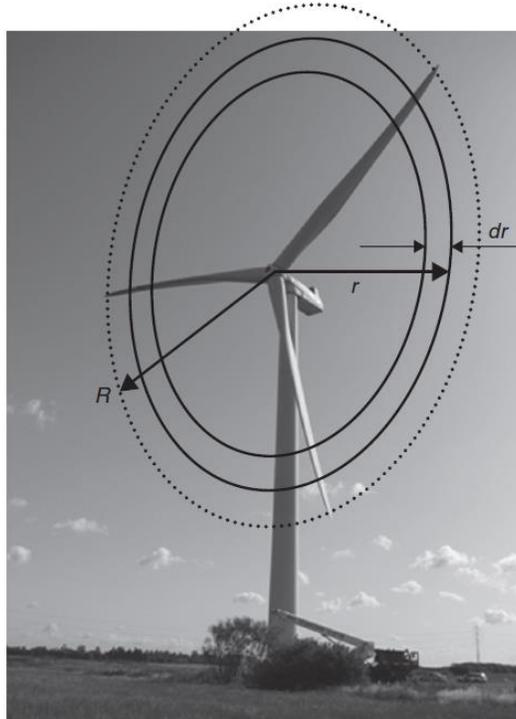
Derivando la expresión del coeficiente de potencia con respecto al factor de inducción se obtiene que el valor máximo de potencia es 16/27, el cual coincide con el límite de Betz mencionado en acápite anteriores. [23].

Si el factor de inducción supera valores entre 0.3 – 0.4, la teoría de momento de una turbina ideal no se puede utilizar, debido a que presentaría fenómenos de turbulencia, haciendo más compleja la determinación de cargas y potencia de la turbina [23].

### **1.3.2 El método clásico de la teoría de momento de elemento álabe**

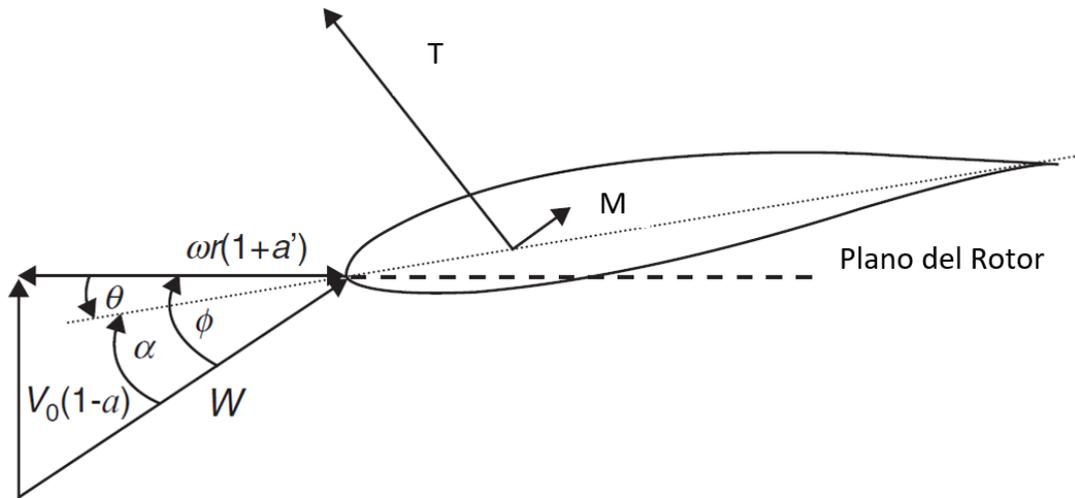
Determinar el comportamiento del flujo de aire que fluye a lo largo del área de barrido de la turbina eólica es muy complejo debido al gran número de interacciones entre partículas. En base a esto el álabe se puede dividir en elementos que presentan un espesor ( $dr$ ), se asume que las interacciones entre partículas de viento no interactúan unas con otras y la distribución de las cargas axiales y tangenciales de velocidad a lo largo del elemento o

sección a analizar son uniformes. [14] En consecuencia, se pueden determinar las cargas a las cuales se encuentra sometido el álabe en un determinado elemento del mismo. [29]



**Figura 1.8** Esquema de turbina eólica con proyección de elemento diferencial “dr” tomado.  
Fuente: Povl BrØndsted and Rogier P.L. Nijssen. Advances in Wind turbine Blade design and materials. [14]

Este método es el más utilizado en la industria, ofreciendo la posibilidad de evaluar el desempeño del rotor, así como la eficiencia de la turbina. Mediante este modelo se puede determinar parámetros de desempeño sin simplificar la selección de parámetros propios del álabe como los ángulos de incidencia, ancho y alto. [29]



**Figura 1.9** Esquema de la sección de un elemento de un ala de turbina eólica. Las flechas indican los sentidos positivos.  
Fuente: Povl Brøndsted and Rogier P.L. Nijssen. Advances in Wind turbine Blade design and materials. [14]

En la **Figura 1.9** se pueden observar los distintos componentes que interactúan con el perfil de un ala de turbina eólica. El ala de turbina presenta una velocidad axial (velocidad del aire)  $V_0$  y la velocidad tangencial (velocidad tangencial)  $r\omega$ . La resultante de estas componentes es la velocidad relativa ( $W$ ). Utilizando este esquema se establecen las siguientes relaciones [14]:

$$\alpha = \phi - \theta$$

**Ecuación 16** Ángulo de ataque

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')r\omega} \leftrightarrow \phi = \arctan\left(\frac{(1-a)V_0}{(1+a')r\omega}\right)$$

**Ecuación 17** Ángulo de flujo de viento

En donde  $\alpha$  es el ángulo de ataque, el cual representa el ángulo entre el flujo de aire con respecto al eje de la cuerda del ala. Los otros componentes como  $\theta$  y  $\phi$  derivan del uso de esta variable. [14] [29] Para cada elemento anular, la ecuación del arrastre y el torque son respectivamente la **Ecuación 18** y **Ecuación 19**. En donde  $r$  es el radio del

elemento diferencial con respecto al eje del rotor,  $a$  es el factor de inducción axial,  $a'$  es el factor de inducción tangencial,  $V_0$  es la velocidad promedio del aire,  $\omega$  es la rotación angular del rotor y  $\rho$  es la densidad del aire. [14]

$$dT = \frac{1}{2} 4\pi r \rho V_0^2 a(1 - a) dr$$

**Ecuación 18** Componente diferencial de arrastre en función de componentes aerodinámicos.

$$dM = \frac{1}{2} 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1 - a) a' dr$$

**Ecuación 19** Componente diferencial de empuje en función de componentes aerodinámicos.

Los coeficientes de fuerza normales al plano del rotor son  $c_n$  y  $c_t$ , los coeficientes de arrastre  $c_d$  y empuje  $c_l$  son valores previamente calculados y se extraen de la literatura. [14]

$$c_n = c_l \cos \phi + c_d \sin \phi$$

**Ecuación 20** Coeficientes de fuerza en el eje y.

$$c_t = c_l \sin \phi - c_d \cos \phi$$

**Ecuación 21** coeficientes de fuerza en el eje x.

La siguiente relación se puede extraer de la **Figura 1.9**:

$$V_{rel} \sin \phi = V_0 (1 - a)$$

**Ecuación 22** Velocidad Relativa del Aire con respecto a la velocidad del Aire.

$$V_{rel} \cos \phi = \omega r (1 + a')$$

**Ecuación 23** Velocidad relativa del aire respecto a la rotación del Rotor.

Donde  $V_{rel}$  es la velocidad relativa del flujo de aire,  $\omega$  es la velocidad de rotación del rotor y  $r$  es el radio del elemento diferencial con respecto al eje del rotor.

La solidez del rotor ( $\sigma$ ) se obtiene, con las propiedades del rotor definidas en la **Ecuación 24**, en donde  $c$  es la longitud de cuerda de la sección del álabe analizada,  $B$  es la cantidad de álabes de la turbina y  $r$  es la distancia del elemento anular analizado en el álabe con respecto al eje del rotor. [14]

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r}$$

**Ecuación 24** Factor Adimensional sólido.

Las cargas de arrastre y empuje en el volumen de control con un espesor  $dr$  se desarrollan en la **Ecuación 25** y **Ecuación 26**.

$$dT = \frac{1}{2} \rho B V_o^2 \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} C_n dr$$

**Ecuación 25** Componente Diferencial arrastre en función de componentes aerodinámicos.

$$dM = \frac{1}{2} \rho B V_o \frac{(1-a)\omega r(1+a')}{\sin \phi \cos \phi} C_t dr$$

**Ecuación 26** Componente Diferencial de Empuje en función de componentes aerodinámicos.

Donde:

$B$ =Número de álabes.

$V_o$ =Velocidad promedio del viento(m/s).

$a$ =Factor de inducción axial.

$a'$ =Factor de inducción tangencial.

$C_n$ =Coeficiente de Arrastre.

$C_t$ =Coeficiente de Empuje.

$\Phi$ =Ángulo de flujo del aire (Grados).

$\omega$ =Velocidad angular del rotor(rad/s).

$r$ =Radio con respecto al eje del rotor del elemento diferencial(m).

Los factores de inducción axial y tangencial se re-escriben de la siguiente manera en la **Ecuación 27** y **Ecuación 28**. Estos factores son importantes debido a que estas ecuaciones se tienen que resolver iterando, permitiendo la determinación del ángulo de flujo  $\phi$ , ángulo de ataque local  $\alpha$  y valores de los coeficientes de fuerza  $c_n$  y  $c_t$  realizando el proceso iterativamente hasta converger a una solución. De esta manera utilizando las

ecuaciones mencionadas se puede predecir el comportamiento aerodinámico del rotor para distintos tipos de velocidades de viento. [14]

$$a = \frac{1}{\left(\frac{4\sin^2\phi}{\sigma C_n}\right) + 1}$$

**Ecuación 27** Factor de Inducción Axial con corrección de factor de Prandtl.

$$a' = \frac{1}{\left(\frac{4\sin\phi\cos\phi}{\sigma c_t}\right) + 1}$$

**Ecuación 28** Factor de Inducción Tangencial con corrección de factor de Prandtl.

En función de combinar las fuerzas extraídas en los elementos del álabe con los resultados de la teoría de momento, la respuesta a las fuerzas tangenciales debe incluirse. Por lo cual, la teoría del acápite anterior debe ser ampliada con la parte que refleja el impulso tangencial, tomando en consideración un número finito de cuchillas como se exponen en la **Ecuación 30** y **Ecuación 31**. Donde  $F$  es el factor de corrección de Prandtl para un número finito de álabes expuesto en la **Ecuación 29**. [14]

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \text{ con } f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi}$$

**Ecuación 29** Factor de Corrección de Prandtl.

$$a = \frac{1}{\left(\frac{4F\sin^2\phi}{\sigma C_n}\right) + 1}$$

**Ecuación 30** Factor de inducción axial

$$a' = \frac{1}{\left(\frac{4F\sin\phi\cos\phi}{\sigma c_t}\right) + 1}$$

**Ecuación 31** Relación de factores de inducción tangencial con factores de forma.

En caso se obtengan valores altos para el factor de inducción axial superiores a 0.2-0.4, no se puede aplicar la teoría de momento simple, por lo cual se ha desarrollado un

factor de corrección llamado factor de corrección de Wilson and Walker, que permite seguir utilizando la teoría de momento al corregir estos valores:

$$a = \frac{1}{2} [2 + K(1 - 2ac) - \sqrt{(K(1 - 2ac) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)}]$$

Donde:

$c =$  cuerda del perfil aerodinámico(m).

$a =$  factor de inducción axial.

$ac = 0.2 \times$  factor de corrección de Prandtl ( $F$ ).

Siendo  $K$  igual a:

$$K = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n}$$

**Ecuación 32** Factor de inducción axial para altos valores de  $a$ .

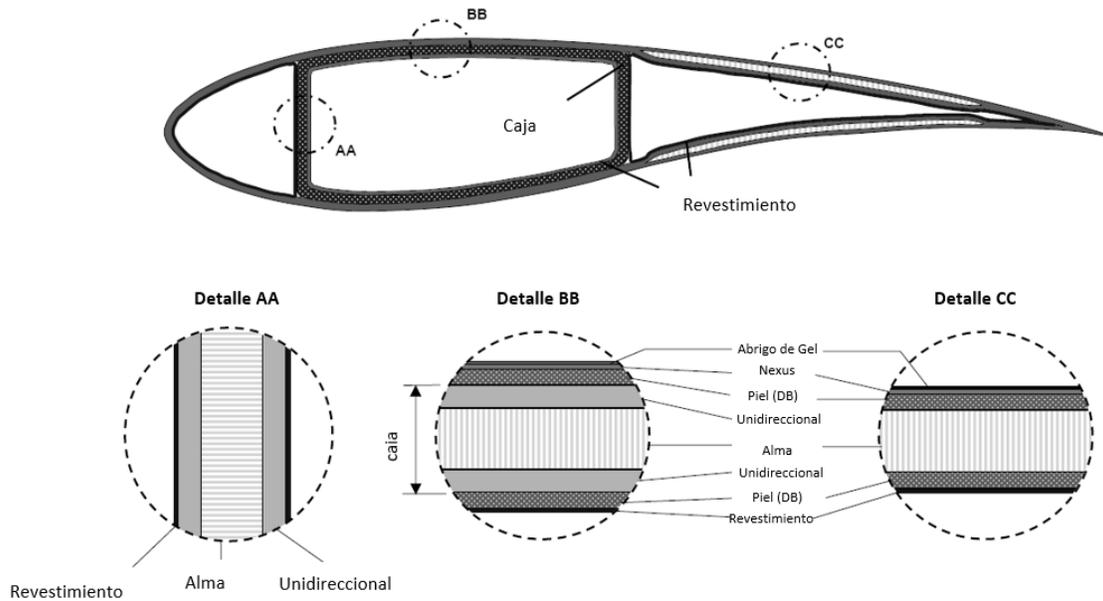
Asimismo, para el cálculo del factor de inducción axial, existe cierta incertidumbre con respecto al cálculo de esta variable, debido a que el arrastre es una variable con gran incertidumbre dependiendo del modelo matemático utilizado, así como de la turbulencia que presenta el fluido en condiciones reales, por lo tanto, existen aproximaciones para corregir altos valores de coeficientes de inducción axial, en la referencia [30] y la referencia [31]. Sin embargo, para fines de este estudio se limitará a utilizar los factores de correcciones mencionados previamente los cuales son ampliamente usados en la mayoría de estudios.

#### **1.4 Materiales Compuestos**

Los álabes constituyen una parte fundamental de la turbina eólica por lo cual deben estar manufacturados correctamente para soportar las condiciones que se les exige. En la actualidad algunos de los métodos utilizados para la fabricación de los álabes son el uso de materiales pre impregnados y la infusión de resina con VARTM (vacuum-assisted resin transfer molding), el cual es uno de los métodos utilizados para la fabricación de materiales compuestos y fabricación de álabes. [32]

Uno de los criterios a tener en consideración durante la selección del material para la fabricación de los álabes de turbina eólica es su longitud, pues a mayor longitud requieren refuerzos más pesados, incrementando la probabilidad de falla. Por otra parte, el uso de álabes de grandes volúmenes permite reducir los daños por concentración de esfuerzos. [32]

Dentro del desarrollo de turbinas eólicas modernas se utilizan compuestos laminados, compuestos sándwich, entre otros. Por lo tanto, se requiere de un conocimiento de la mecánica de materiales compuestos a una escala macro mecánica y micro mecánica con el fin de establecer el material que mejores condiciones desempeñe frente a las cargas aerodinámicas a las cuales se someten estos elementos mecánicos. Como se puede apreciar en la **Figura 1.10**, los álabes se encuentran conformados por distintas clases de materiales compuestos dependiendo de los requerimientos que se necesiten. [13]



**Figura 1.10** Estructura típica de un álabe de turbina eólica.  
Fuente: G.Bir and P. Migliore . Preliminary Structural Design of Composite Blades for Two and Three blade Rotors. [33]

A continuación, se dará una breve explicación de los materiales de reforzamiento comúnmente utilizados, así como la matriz que constituirán el material a utilizar en el presente estudio.

### 1.4.1 Reforzamientos

Un componente principal dentro de la fabricación de materiales compuestos es la utilización de fibras naturales o no naturales, material de refuerzo debido a sus propiedades superiores en rigidez, peso y resistencia. Las fibras de refuerzo comúnmente utilizadas en la fabricación de álabes de turbina eólica son fibras de vidrio o fibras de carbono. En la **Tabla 1.2** se puede observar las propiedades de las fibras mencionadas. [34]

Fibras	Módulo de Elasticidad [GPa]	Esfuerzo de Rotura [GPa]	Elongación [%]	Relación de Poisson	
<b>Fibra de Vidrio</b>					
E-Glass	72.35	3.45	4.4	0.22	
S-Glass	85.00	4.80	5.3	0.22	
R-Glass	86.00	4.40	5.2	0.15-0.26	
C-glass	69.00	3.31	4.8	-	
D-glass	55.00	2.50	4.7	-	
<b>Fibra de Carbono</b>					
Torayca (PAN)	T300	230	3.53	1.5	0.2
Torayca (PAN)	T1000	294	7.06	20	-
Torayca (PAN)	M50	490	2.45	0.5	-

**Tabla 1.2** Propiedades típicas de fibras inorgánicas.  
Fuente: Ever J. Barbero Introduction to Composite Materials Design. [34]

#### 1.4.1.1 Fibra de vidrio y carbono

Las fibras de vidrio presentan una ventaja en términos de costo sobre las fibras de carbono. Existe una gran variedad de fibras de vidrio con diferentes propiedades superiores con respecto a las fibras de carbono. Sin embargo, al realizar un punto de equilibrio en casos donde se requiera una resistencia considerada y bajo costo se opta por las fibras de vidrio. Cuando el costo pasa a un segundo plano y lo que prima es la resistencia se opta por las fibras de carbono. En la **Tabla 1.2** se pueden observar las propiedades mecánicas y físicas de las fibras mencionadas. [34]

### 1.4.1.2 Fibras Naturales

Las fibras naturales presentan un sector emergente, el cual mantiene como propuesta una alternativa eco-amigable. En el 2010 el uso de fibras naturales en el mercado europeo representaba el 1.9 % de todas las fibras utilizadas, los compuestos con refuerzo de Bio-Fibras, representan una potencia no tradicional, brindando valor agregado a las comunidades agricultoras. [8] [11]

En términos de propiedades mecánicas, las fibras naturales presentan características inferiores en comparación con las fibras de vidrio o carbono. En muchas de las aplicaciones industriales las fibras naturales o vegetales se emplean principalmente como refuerzos livianos, baratos y “verdes” sin ningún rol estructural. Sin embargo, propiedades como su baja densidad, propiedades específicas, rigidez, etc., permiten que sean competitivas en ciertos sectores específicos o aplicaciones con requerimientos determinados. En la **Tabla 1.3** se pueden visibilizar las propiedades mecánicas de ciertas fibras naturales utilizadas en estudios previos. [8] [11]

Matrices Termoestables	Densidad (g*cm <sup>3</sup> )	Diámetro [µm]	Esfuerzo de Tracción a la Rotura [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Elongación por Tracción [%]
<b>Flax</b>	1.5	40-600	345-1500	27.6	<b>2.7-3.2</b>
<b>Hemp</b>	1.47	25-500	690	70	1.6
<b>Jute</b>	1.3-1.49	25-200	393-800	13-26.5	1.16-1.5
<b>Kenaf</b>			930	53	1.6
<b>Ramie</b>	1.55	----	400-938	61.4-128	1.2-3.8
<b>Nettle</b>			650	38	1.7
<b>Sisal</b>	1.45	50-200	468-700	9.4-22	3-7
<b>Henequen</b>					
<b>Palf</b>		20-80	413-1627	34.5-82.5	1.6
<b>Abaca</b>			430-760		
<b>Oil palm EFB</b>	0.7-1.55	150-500	248	3.2	25
<b>Oil palm mesocarp</b>			80	0.5	17
<b>Cotton</b>	1.5-1.6	12-38	287-800	5.5-12.6	7-8
<b>Coir</b>	1.15-1.46	100-460	131-220	4-6	15-40

**Tabla 1.3** Propiedades mecánicas de fibras naturales.

Fuente: Amar K. Mohanty, Majusri Misra, Lawrence T. Drzal. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. [8]

Como se expone en la **Tabla 1.3**, las fibras naturales presentan distintos tipos de aplicaciones. Asimismo, las propiedades expuestas exponen valores máximos en ciertas partes del objeto de estudio. Realizando una comparación entre las fibras naturales y la fibra de vidrio, se observa que las primeras presentan condiciones superiores en aspectos ecológicos; por otra parte, las características económicas y físicas varían con respecto al tipo de fibra. [11]

#### 1.4.1.3 Fibras Naturales *Stipa Obtusa*

Las fibras naturales que serán objeto de estudio de esta tesis son las fibras de la especie *Stipa Obtusa*, las cuales son nativas del Perú. El uso de estas fibras no tiene carácter industrial actualmente, debido a que no había un interés científico o un análisis concreto de las propiedades de las mismas.

Recientemente se han desarrollado análisis para determinar las propiedades mecánicas de esta especie, realizando análisis de temperatura óptima y longitud de las fibras, utilizando todos los criterios para poder realizar una caracterización adecuada de las propiedades mecánicas de las fibras de *Stipa Obtusa*. [35]

Longitud de fibra (mm)	N° de fibras	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo tangencial (GPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de Weibull (esfuerzo)	Parámetro de escala (esfuerzo MPa)	Módulo de Weibull (deformación)	Parámetro de escala (deformación mm/mm)
10	42	625.17 (326.55)	24.04 (14.09)	0.0386 (0.0138)	2.002	705.44	3.049	0.0431
20	52	602.35 (279.30)	33.9 (19.19)	0.0236 (0.0064)	2.286	679.97	4.137	0.0260
30	50	514.13 (269.49)	30.05 (17.97)	0.0344 (0.0102)	1.994	580.11	3.747	0.0381
40	50	354.41 (178.80)	25.1 (12.78)	0.0392 (0.0126)	2.081	400.12	3.442	0.0436

**Tabla 1.4** Propiedades mecánicas de *Stipa Obtusa* a longitudes de 10, 20, 30 y 40 mm ensayadas a 0.5 mm/min (varianza de ellos resultados entre paréntesis).

Fuente: Sergio Candiotti. Caracterización mecánica de las fibras técnicas de Ichu y Cabuya. [35]

Como se puede apreciar, la información expuesta sustenta que las propiedades mecánicas de las fibras naturales de *Stipa Obtusa* presentan valores muy cercanos a los expuestos en la **Tabla 1.3**. Se puede asumir que su uso industrial no se encuentra fuera de las características de las fibras ya industrializadas actualmente.

## **1.4.2 Material de Matriz**

La matriz tiene una gran variedad de funciones, entre las que destacan: La función de mantener las fibras de refuerzo en su posición, evitando el método de falla por deslizamiento de fibras; establecer la capacidad térmica límite que puede soportar el material compuesto; establecer las propiedades de carga transversales, así como brindar capacidad de carga frente a la deflexión; establecer las propiedades térmicas y/o corrosión del material compuesto y transferir las cargas a las fibras de refuerzo, a través de la interface. [34]

### **1.4.2.1 Matrices Termoestables**

Las matrices termoestables están formadas por enlaces cruzados en forma de matriz polimérica. Se caracterizan por su baja viscosidad, lo que permite tener una buena impregnación de las fibras de refuerzo en la matriz. Las resinas durante su curado pueden liberar reacciones exotérmicas o endotérmicas, dependiendo del catalizador y de la reactividad de la resina misma, este factor se tiene que tomar en cuenta, así como la gelificación para la manufactura de compuestos. La contracción volumétrica es de importancia crítica debido a su efecto en las dimensiones finales de la pieza, así como, también es importante el factor de contracción volumétrica, pudiendo inducir tensiones internas, lo que provocaría agrietamiento y desalineación de la fibra. [34]

### **1.4.2.2 Poliéster**

Las Resinas de Poliéster son las más utilizadas en la industria actualmente, pues tiene un buen desempeño en la aplicación con fibras sintéticas. Sin embargo, hay estudios que sustentan su uso en conjunto con fibras naturales como compuestos fabricados a base de lino o knaf. [36] En la siguiente **Tabla 1.5** se muestran las propiedades típicas que presentan las matrices termoestables.

Matrices Termoestables	Módulo de elasticidad	Esfuerzo de Rotura [MPa]	Esfuerzo de compresión [MPa]	Esfuerzo Cortante ÑMPa]	Elongación por Tracción [%]
<b>Poliéster</b>					
Orthophtalic	3.4	55.2	-	-	2.1
Isophthalic	3.4	75.9	117.2	75.9	3.3
BPA Fumarate	2.8	41.4	103.5	-	1.4
Chlorendic	3.4	20.7	103.5	-	-
Vinyl Ester Derakane 411-45	3.4	82.7	117.1	82.7	5-6
<b>Epoxy</b>					
8551-7	4.089	99.2	-	-	4.4
8552	4.667	100.0	-	-	1.7
9310/9360 23°C	3.12	75.8	-	-	4.0
9310/9360 149°C	1.4	26.2	-	-	5.2
9420/9470 (A) 23°C	2.66	57.2	-	-	3.1
9420/9470 (B) 23°C	2.83	77.2	-	-	5.2
HTP1072/1062-M 23°C	3.383	-	-	-	-

**Tabla 1.5** Propiedades típicas de matrices termoestables  
Fuente: Ever J. Barbero Introduction to Composite Materials Design. [34]

### 1.4.2.3 Epoxy

La matriz epóxica es utilizada ampliamente en la industria debido a su versatilidad, altas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. El epóxico se reduce menos que otras matrices, lo que permite explicar sus características adhesivas. Además, son una buena opción debido a sus propiedades de curado en condiciones de calor y frío. Usualmente se utilizan como adhesivos para estructuras de panel de aviación y como resinas de laminación para aplicación de fuselaje y misiles, estructuras de filamentos enrollados y herramientas. [34]

Las matrices epóxica presentan una amplia gama de usos, tanto en la construcción como en el rubro civil, debido a sus propiedades químicas y mecánicas frente a esfuerzos eléctricos por su alta capacidad de aislamiento eléctrico. El costo de la resina es proporcional al rendimiento de la misma, en la **Tabla 1.5** se listan ciertas matrices con sus propiedades mecánicas.

#### **1.4.2.4 Matriz para compuestos de fibra naturales**

Según lo expuesto, las matrices termoestables como epóxica y poliéster son utilizadas en su mayoría y que son las más adecuadas para la fabricación de materiales compuestos a base de fibras naturales [37]. Además, al realizar una comparación entre ambas resinas se detalla la superioridad de la matriz epóxica en comparación con las matrices de poliéster, esto es debido a las propiedades mecánicas del epoxy, las cuales son superiores a las del poliéster. Un factor muy importante es el parámetro de mojabilidad, el cual está relacionado a la tensión superficial y energía superficial que permiten una mejor adhesión de las moléculas superficiales entre la resina y el refuerzo de fibra. [37]

### **1.4.3 Laminados de material compuesto**

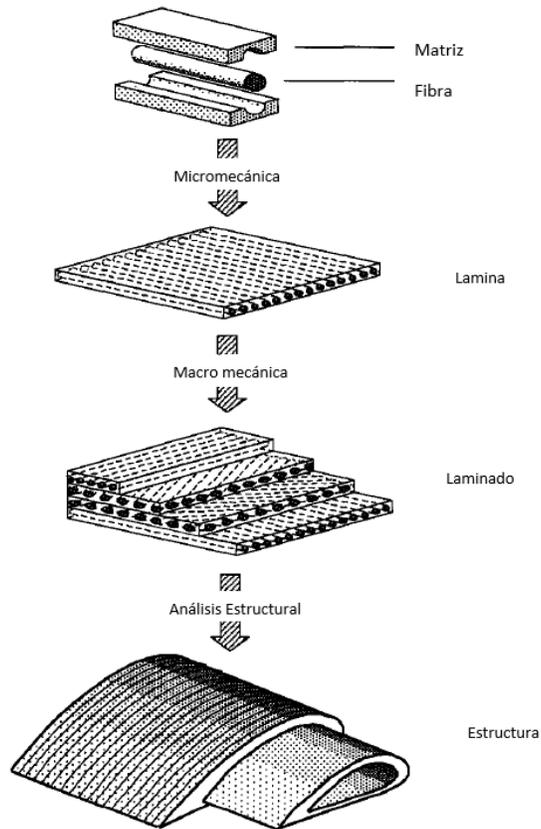
#### **1.4.3.1 Fibras discontinuas y continuas**

Las propiedades mecánicas de las fibras de reforzamiento constituyen un factor importante en el material compuesto. Sin embargo, la disposición de las fibras dentro de la matriz es otro factor relevante en la evaluación de las propiedades del material. El utilizar fibras continuas o discontinuas, influyen en dos puntos el costo de manufactura y las propiedades que se requieran. La manufactura de fibras continuas suele ser más costosa con respecto a fibras discontinuas. Materiales compuestos utilizando este tipo de reforzamiento (fibras continuas) alcanzan un 50% de esfuerzo y 90 % de rigidez superior con respecto a las fibras discontinuas. Asimismo, las propiedades finales del material compuesto se determinarán acorde a las propiedades de ambos materiales y al proceso de manufactura del material compuesto. El correcto alineamiento de las fibras durante el proceso de manufactura asegura mejores condiciones de desempeño del material. [34]

#### **1.4.3.2 Características de laminados**

Los laminados de materiales compuestos son capas o láminas de fibras unidireccionales en un tejido de matriz. La lámina es un material orto trópico con ejes de

coordenadas principales en la dirección de las fibras (longitudinal) y plano transversal a las fibras, un material compuesto usualmente está conformado por láminas de fibras unidireccionales embebidas en resina en diferentes orientaciones. Estas orientaciones varían con respecto a las necesidades o características que se requieran en el material. Los materiales compuestos laminados que contienen más de dos capas de diferentes tipos se designan laminados compuestos híbridos, puede haber permutaciones de vidrio/epoxy en conjunto con carbono/epoxy unidireccionales. Estos materiales son designados de una manera que se puedan identificar la cantidad, tipo, orientación y secuencia de apilamiento de capas. Las láminas o laminados son los que conforman las distintas estructuras; por lo tanto, es necesario su conocimiento para los análisis posteriores. [38]



**Figura 1.11** Niveles de observaciones y tipos de análisis de materiales compuestos.  
Fuente: Issac M. Daniel. Engineering Mechanics of Composite Materials [38]

### 1.4.3.3 Laminados de fibras naturales endémicas del Perú

Las propiedades de laminados a base de fibras naturales de *Stipa Obtusa*, se han obtenido en las investigaciones previas [39], donde se establecen las distintas características que presenta la manufactura de fibras naturales de *Stipa Obtusa* en conjunto con la Resina de Poliéster. En la **Tabla 1.6**, se detallan los módulos elásticos, relaciones de poisson, módulo cortante y esfuerzos límite con respecto a los ejes principales para un laminado con volumen de fracción del 35%.

Propiedades	Valores
Densidad(g/cm <sup>3</sup> )	1.3133
Módulo de Elasticidad (E) en el eje 1 (GPa)	11
Módulo de Elasticidad (E) en el eje 2 (GPa)	4.32
Módulo de Elasticidad (E) en el eje 3 (GPa)	4.32
Relación de Poisson 12 (v)	0.36
Relación de Poisson 23 (v)	0.43
Relación de Poisson 13 (v)	0.36
Módulo Cortante (G) 12 (GPa)	1.56
Módulo Cortante (G) 23 (GPa)	1.51
Módulo Cortante (G) 13 (GPa)	1.56
Esfuerzo de Tracción Límite en el eje 1 (MPa)	118
Esfuerzo de Tracción Límite en el eje 2 (MPa)	50
Esfuerzo de Tracción Límite en el eje 3 (MPa)	50
Esfuerzo de Compresión Límite en el eje 1 (MPa)	50
Esfuerzo de Compresión Límite en el eje 2 (MPa)	50
Esfuerzo de Compresión Límite en el eje 3 (MPa)	50
Esfuerzo Cortante Limite en el eje 12 (MPa)	20
Esfuerzo Cortante Limite en el eje 23 (MPa)	20
Esfuerzo Cortante Limite en el eje 13 (MPa)	20

**Tabla 1.6** Propiedades Mecánicas de compuesto laminado de *Stipa Obtusa*.

Fuente: Caracterización y modelamiento de la fibra de Ichu para su uso como refuerzo en materiales compuestos laminados. [39]

## 1.5 Mecánica de materiales compuestos

Para determinar el desempeño estructural, es imperativo determinar la caracterización de los materiales utilizados [21]. A continuación, se presenta los conceptos relacionados al comportamiento mecánico de los materiales compuestos, los cuales

presentan diferentes propiedades con respecto a los materiales cotidianos debido a la heterogeneidad de sus propiedades.

### **1.5.1 Micro mecánica de Materiales compuestos**

Como se estableció en la **Figura 1.11**, el estudio de la micro mecánica de materiales abarca el cálculo de las propiedades de una lámina, estudiando el comportamiento de la interacción de un determinado número de fibras y resina. Se toma en conocimiento los estados locales de deformación y tensión del refuerzo y matriz. [38]

Los compuestos con baja relación de fibra tienden a tener una distribución aleatoria de fibra, mientras que en contraparte presentan un empaque hexagonal que permite un empaquetamiento y predicción de sus propiedades. El empaquetamiento hexagonal es el deseado, pues permite el desarrollo de teorías de macro mecánica de materiales más precisa y con menos ratio de falla. Así mismo, uno de los objetivos principales es obtener ciertas propiedades del compuesto como la rigidez, para lo cual es necesario tener conocimientos de la micromecánica para entender lo expuesto en la macro mecánica de materiales compuestos. [38]

### **1.5.2 Macro mecánica de materiales compuestos**

La macro mecánica de materiales compuestos permite implementar o analizar el material compuesto a un nivel de compuesto laminado, en donde varias láminas de fibra embebida en resina interactúan entre sí, pudiendo predecir las propiedades del conjunto de laminados que conforman la estructura, simplificando en gran medida los métodos de cálculo establecidos en la micro mecánicas. [38]

#### **1.5.2.1 Materiales Anisotrópicos**

La matriz de estado esfuerzos estado de esfuerzos de la mecánica general usualmente es representada por nueve componentes de esfuerzos  $\sigma_{ij}$  (donde  $i, j = 1, 2, 3$ ) actuando en los lados de un cubo elemental cuyos lados del elemento cúbico son lados paralelos a los ejes de coordenadas del mismo 1,2,3, los cuales conforman el sistema de referencia. De igual manera, se encuentra la existencia de la matriz de componentes de

deformaciones, las cual se relaciona con la ley de Hooke [38]. La representación se muestra en la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2321} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3121} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1221} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3221} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1321} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2131} & C_{2112} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2121} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} \end{bmatrix}$$

**Ecuación 33** Matriz de Complementos de esfuerzos.

Fuente: Issac M. Daniel. Engineering Mechanics of Composite Materials [38]

Al tomar un elemento infinitesimal cúbico y utilizar la matriz previamente establecida, se puede determinar la matriz de rigidez y compliance del elemento tridimensional. De esta manera, realizando las equivalencias y evaluando las constantes se obtiene la segunda matriz de esfuerzos para materiales anisotrópicos. [38]

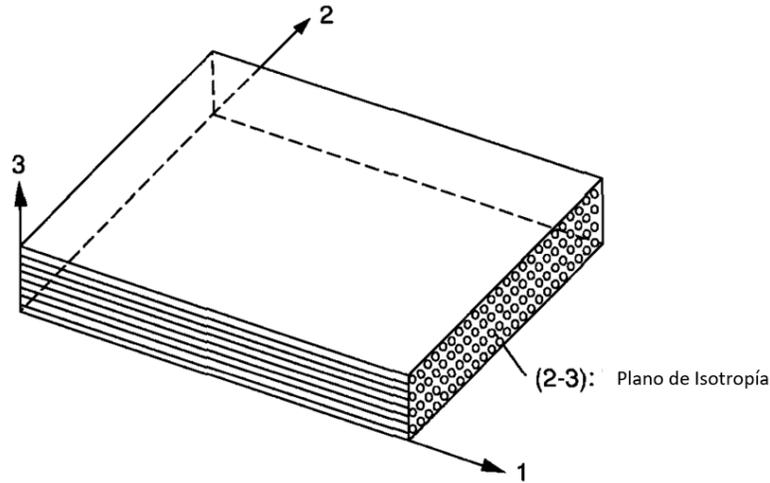
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix}$$

**Ecuación 34** Matriz de Complementos de Esfuerzos.

Fuente: Issac M. Daniel. Engineering Mechanics of Composite Materials [38]

### 1.5.2.2 Materiales anisotrópicos transversales

Un material orto trópico es también llamado transversalmente isotrópico cuando uno de sus planos principales es un plano isotrópico (como el plano 2-3). Varias fibras unidireccionales en un arreglo que permite cierta uniformidad de propiedades sobre el plano. Esta disposición puede considerarse transversalmente isotrópica de acuerdo a la **Figura 1.12**. [38]



**Figura 1.12** Material Orto trópico con isotropía transversal.  
 Fuente: Issac M. Daniel. Engineering Mechanics of Composite Materials [38]

Esta distribución es utilizada con fibras unidireccionales como lo son carbón/epoxy, aramid/epoxy y vidrio/epoxy con ratios de volumen elevados. Teniendo esto en consideración, la relación de Esfuerzo – Deformaciones se simplifica en la matriz de Esfuerzos a 5 constantes independientes, como se muestran en la siguiente matriz. [38]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix}$$

**Ecuación 35** Matriz de complementos de esfuerzos para un material ortotrópico con isotropía transversal.  
 Fuente: Issac M. Daniel. Engineering Mechanics of Composite Materials [38]

Para la evaluación de las propiedades mecánicas del material compuesto, se tomó en consideración la distribución de material anisotrópico transversal, debido a que la distribución de las fibras de *Stipa Obtusa* es hexagonal, por lo que uno de los planos principales es anisotrópico. Sin embargo, el software ANSYS ACP PRE toma en consideración como si fuera un material ortotrópico, las propiedades del mismo.

### 1.5.3 Esfuerzos en Laminados Compuestos

#### 1.5.3.1 Máximo Criterio de Esfuerzos

Este criterio determina la falla de un compuesto laminado cuando uno de sus esfuerzos excede los límites experimentales definidos. Establece que si se supera uno de los límites establecidos el compuesto falla. Desde un punto de vista las cantidades  $F_{1t}$ ,  $F_{1c}$ ,  $F_{2t}$ ,  $F_{2c}$ ,  $F_4$ ,  $F_5$ ,  $F_6$  son valores límites. Asimismo, los valores de esfuerzos aplicados se incrementan por factores de carga superiores a 1 y los valores límite establecidos disminuyen por factores menores a 1. El criterio establece que la falla ocurre si alguna de las siguientes reglas se cumple. Los valores en compresión se toman como valores positivos (abs) debido a que se comparan con valores límite. [34]

$$\sigma_1 > F_{1t} \text{ Si } \sigma_1 > 0$$

$$abs(\sigma_1) > F_{1c} \text{ Si } \sigma_1 < 0$$

$$\sigma_2 > F_{2t} \text{ Si } \sigma_2 > 0$$

$$abs(\sigma_2) > F_{2c} \text{ Si } \sigma_2 < 0$$

$$abs(\sigma_4) > F_4 \text{ } abs(\sigma_5) > F_5; \text{ } abs(\sigma_6) > F_6$$

Si los valores de esfuerzo último son multiplicados por modificadores, se encuentran dentro del rango de operación. En términos de ratio de esfuerzo, el máximo criterio de esfuerzo se determina como [34]:

$$\begin{aligned} R_1 &= F_{1t}/\sigma_1 ; \text{ if } \sigma_1 > 0 \text{ or } & R_1 &= -F_{1c}/\sigma_1 ; \text{ if } \sigma_1 < 0 \\ R_2 &= F_{2t}/\sigma_2 ; \text{ if } \sigma_2 > 0 \text{ or } & R_2 &= -F_{2c}/\sigma_2 ; \text{ if } \sigma_2 < 0 \\ R_4 &= F_4/abs(\sigma_4); & R_5 &= F_5/abs(\sigma_5); & R_6 &= F_6/abs(\sigma_6). \end{aligned}$$

Donde:

$R_x$  Representa la relación entre el esfuerzo último en la dirección x y el esfuerzo aplicado en la misma dirección.

$\sigma_x$ =Esfuerzo aplicado en la dirección x.

### 1.5.3.2 Máximo criterio de deformación

El criterio máximo de deformación es el más utilizado. Utilizando análogamente los criterios de ratio esfuerzo último se pueden convertir a través de la mecánica de materiales clásica en ratio de esfuerzos. [34]

$$\begin{array}{lll}
 R_1 = \epsilon_{1t}/\epsilon_1 ; \text{ if } \epsilon_1 > 0 \text{ or} & R_1 = -\epsilon_{1c}/\epsilon_1 ; \text{ if } \epsilon_1 < 0 & \\
 R_2 = \epsilon_{2t}/\epsilon_2 ; \text{ if } \epsilon_2 > 0 \text{ or} & R_2 = -\epsilon_{2c}/\epsilon_2 ; \text{ if } \epsilon_2 < 0 & \\
 R_4 = \gamma_{4u}/\text{abs}(\epsilon_4) & R_5 = \gamma_{5u}/\text{abs}(\epsilon_5) & R_6 = \gamma_{6u}/\text{abs}(\epsilon_6).
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
 \epsilon_{1t} = F_{1t}/E_1 & \epsilon_{1c} = F_{1c}/E_1 & \\
 \epsilon_{2t} = F_{2t}/E_2 & \epsilon_{2c} = F_{2c}/E_2 & \\
 \gamma_{4u} = F_4/G_{23} & \gamma_{5u} = F_5/G_{13} & \gamma_{6u} = F_6/G_{12}
 \end{array}$$

## 1.6 Diseño estructural, material y métodos de prueba de álabe de turbina eólica

### 1.6.1 Cargas en el álabe

En la industria el uso de software ha facilitado la determinación de las cargas en distintos puntos del álabe, la determinación analítica de estas cargas es una laboriosa tarea debido a que los álabes presentan una variación de ángulo de incidencia y sección por cada punto analizado, haciendo esta tarea difícil de calcular. [40] [41]

Conforme a lo establecido en la norma IEC 61400-2, para el diseño de turbinas eólicas pequeñas se establecen los siguientes tipos de carga. [41]

#### 1.6.1.1 Carga aerodinámica

Las cargas aerodinámicas se pueden clasificar como estáticas y dinámicas, causadas por la interacción del flujo de aire con las partes estáticas y dinámicas de la turbina eólica pequeña. Las cargas incidentes en el álabe que producen el movimiento son generadas por el empuje y arrastre de los álabes, por lo cual es dependiente principalmente de la velocidad. El empuje aerodinámico se resume en un movimiento útil en la dirección de

rotación, el cual es absorbido por el generador y el arrastre en dirección paralela al eje del rotor. Estas cargas tienden a generar cierta deflexión en los álabes, la cual debe encontrarse dentro de los límites establecidos. [40] [41]

Para el cálculo de las cargas aerodinámicas se utiliza el método de la teoría de Momento Aerodinámico (BEM) resaltada en la **sección 1.3.2**. Es aceptado también realizar una sumatoria de las cargas aplicadas y tener un valor promedio de las reacciones del álabe frente a estas cargas. [40]

#### **1.6.1.2 Carga gravitacional y centrífuga**

Las cargas centrífugas y gravitacionales son dependientes de la inercia del álabe, debido a esto las turbinas que se encuentran por debajo de los 10 metros de diámetro pueden considerar como despreciable esta carga; mientras que se deben considerar cargas marginales para las turbinas de 20 metros y críticas para las turbinas de 70 metros o superiores. La carga gravitacional es el peso ocasionado por la propia masa, mientras que la carga centrífuga es producto de la velocidad rotacional y la masa al cuadrado, la cual actúa de manera radial. [40]

Estas cargas son las más influyentes al momento de realizar un análisis dinámico sobre el álabe de turbina eólica, debido a que presentan mayor criticidad en el análisis con respecto a otras ciertas consideraciones.

#### **1.6.2 Criterio de Diseño**

La normativa IEC 61400-2 establece distintas situaciones de diseño dependiendo del método de cálculo a utilizar. En vista, que el método utilizado en el presente trabajo es el Aero elástico (Método de Viga y Simulación Computacional), para la construcción del álabe se determinó la situación de diseño por “Producción de Potencia”, la cual se encuentra sometida a 5 condiciones de viento que implica un análisis de cargas últimas, con distinción de la primera la cual evalúa la densidad espectral de turbulencia en el fluido. En la **Tabla 1.7** se puede observar los casos de carga de diseño evaluados.

Situaciones de Diseño	Casos de Carga de Diseño	Condiciones de Viento	Tipos de Analisis
Producción de Potencia	1.1	NTM $V_{entrada} < V_{hub} < V_{salida}$ $V_{salida}$ o $3V_{promedio}$	Fatiga, Cargas últimas
	1.2	ECD $V_{gondola} < V_{diseño}$	Cargas últimas
	1.3	$EOG_{50}$ $V_{entrada} < V_{gondola} < V_{salida}$ o $3V_{promedio}$	Cargas últimas
	1.4	$EDC_{50}$ $V_{entrada} < V_{gondola} < V_{salida}$ o $3V_{promedio}$	Cargas últimas
	1.5	ECG $V_{gondola} = V_{diseño}$	Cargas últimas

**Tabla 1.7** Casos de Carga de Diseño

Fuente: IEC61400-2. Design Requirements for small wind turbines. [41]

La norma IEC61400-2 establece que, para el diseño de álabes mediante la situación de diseño de Producción de potencia, los casos de carga se resumen en 5 escenarios:

- Método de turbulencia Normal (NTM): Este método incluye los vientos cortantes en el modelo de perfil normal del aire. Este método toma en consideración los cambios constantes que presenta el aire en un medio. Para las clases de estándares de turbinas pequeñas, la densidad espectral de potencia del campo vectorial aleatorio de viento, si se utiliza en el modelo Aero elástico tiene que satisfacer los requerimientos establecidos en este modelo.
- Método de Ráfaga Coherente extrema (ECG): Este método establece que una ráfaga de viento extrema con una magnitud de  $V_{cg}=15$  m/s debe ser asumida. Por lo cual, el análisis se debe evaluar con la velocidad de viento establecida en este método.
- Método de ráfaga Coherente extrema con cambio de dirección (ECD): Este método, evalúa la velocidad del viento descrito en el método de Ráfaga coherente extrema con un cambio de dirección, tomando en consideración que el cambio de dirección y la velocidad de ráfaga ocurren al mismo tiempo en el análisis Aero elástico.
- Ráfaga de Operación Extrema ( $EOG_{50}$ ): Este método establece que en el transcurso de 50 años la velocidad del viento, oscilará alrededor de unos

valores máximos determinados, los cuales se deben evaluar en el modelo Aero elástico.

- Cambio de Dirección Extrema ( $EDC_{50}$ ): Este método análogamente al método anterior, establece los cambios de dirección en 50 años del viento obteniendo unos valores máximos a evaluar en el modelo Aero elástico.

El desarrollo para el cálculo de los métodos de condiciones extremas, así como los métodos de ráfaga coherente extrema se encuentran detallados en la normativa IEC61400-2. [41]

### 1.6.2.1 Factor de Seguridad

#### Factores de Seguridad Parciales para material

Los factores de seguridad del material aplicados en este acápite remarcan un refuerzo a las consideraciones de seguridad previamente establecidas con un 95% de confiabilidad para el caso de los esfuerzos. En la **Tabla 1.8** se muestran los distintos tipos de factores de seguridad parciales de acuerdo al tipo de análisis. [41]

Condiciones	Caracterización Completa $\gamma_m$	Mínima Caracterización $\gamma_m$
Esfuerzo de fatiga	1,25	10,0
Esfuerzo último	1,1	3,0

**Tabla 1.8** Factores de seguridad Parciales para Materiales.

Fuente: IEC61400-2. Design Requirements for small wind turbines. [41]

#### Factores de Seguridad Parciales para cargas

Los factores de seguridad para cargas se encargan de corregir la incertidumbre dentro de la estimación de las cargas de diseño dependiendo del método de cálculo utilizado. En la **Tabla 1.9** se pueden apreciar los factores para los métodos de determinación de cargas usando el modelamiento Aero elástico. [41]

Método de Determinación de Cargas	Factor de Seguridad para cargas por Fatiga $\gamma_f$	Factor de Seguridad para cargas de Esfuerzo último $\gamma_f$
Cálculo de Cargas Simples	1,0	3,0
Modelamiento Aero elástico con información de diseño (r.p.m., potencia)	1,0	1,35

Mediciones de Cargas con extrapolación	1,0	3,0
--	-----	-----

**Tabla 1.9** Factores de seguridad Parciales para Cargas  
Fuente: IEC61400-2. Design Requirements for small wind turbines. [41]

### 1.6.2.2 Condiciones límite de análisis

Para turbinas pequeñas se establece que el tiempo mínimo de vida útil deseado es de 50 años, [40] por lo cual es vital tener en consideración algunos criterios para brindar las condiciones que la tecnología de esta envergadura requiere.

#### Análisis de esfuerzo último

Conforme a la normativa IEC 61400-2 [41], el análisis de esfuerzo último se debe diseñar en base a la siguiente ecuación:

$$\sigma_d < \frac{fk}{\gamma_m \gamma_f}$$

**Ecuación 36** Esfuerzo último según normativa.

Donde:

$f_k$  es el esfuerzo característico del material.

$\gamma_m$  es el factor de seguridad parcial del material.

$\gamma_f$  es el factor de seguridad parcial de las cargas.

#### Fatiga

El daño por fatiga causado por todos los casos de cargas que producen fatiga debe ser combinado. Este debe ser calculado utilizando teoría de fatiga el cual establece que el límite de fatiga es sobrepasado cuando el daño acumulado supera el valor de 1. De no existir curvas de esfuerzos versus ciclos de vida útil (S-N), la norma establece que se debe utilizar el criterio de análisis de esfuerzo último con el esfuerzo característico del material. [41]

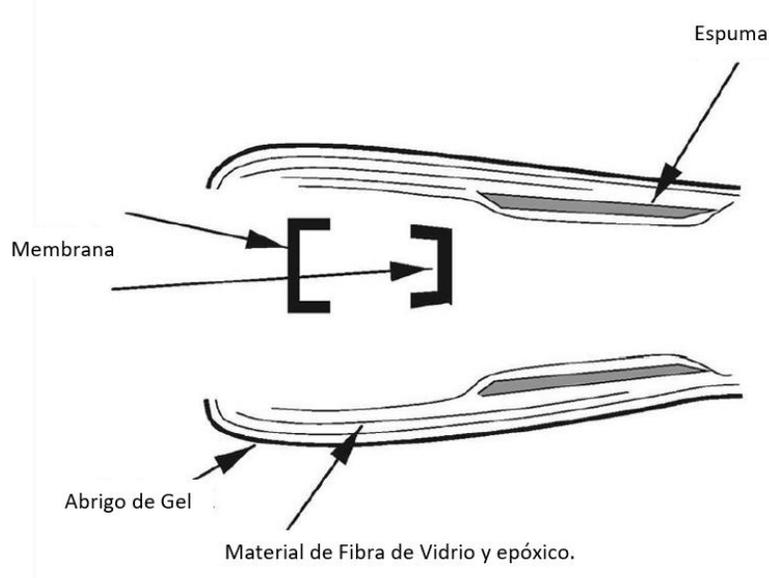
### 1.6.3 Teoría de viga para álabe de turbina eólica

Para la construcción de un álabe de turbina eólica lo suficientemente rígido y fuerte, se requiere tener en cuenta ciertas consideraciones y asumir algunos criterios. El material a utilizar para la fabricación de las placas superior e inferior del álabe lo definen los parámetros de diseño como capacidad de carga máxima, rigidez, peso, costo y fatiga. Estos parámetros definen cual sería el más adecuado para la fabricación del álabe. La parte superior (lado de succión) y la parte inferior (lado de presión) del álabe, las cuales conforman la armadura principal de la turbina, están hechas de materiales compuestos laminados con refuerzo de fibras, una estructura similar se puede apreciar en la **Figura 1.13**. [23] [42]



**Figura 1.13** Sección de un álabe de turbina eólica  
Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

En ciertas aplicaciones, las cuales requieren que las turbinas soporten condiciones de mayor rigurosidad, se implementa un refuerzo interno del álabe llamado web, el cual está conformado por laminados en forma de U hechos a base de material compuesto, fijados mediante pegamento a las placas superior e inferior. La estructura básica de una turbina eólica se detalla en conjunto con sus componentes en la **Figura 1.14**. [23] [42]



**Figura 1.14** Bosquejo esquemático de una sección de un álabe de turbina eólica  
Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

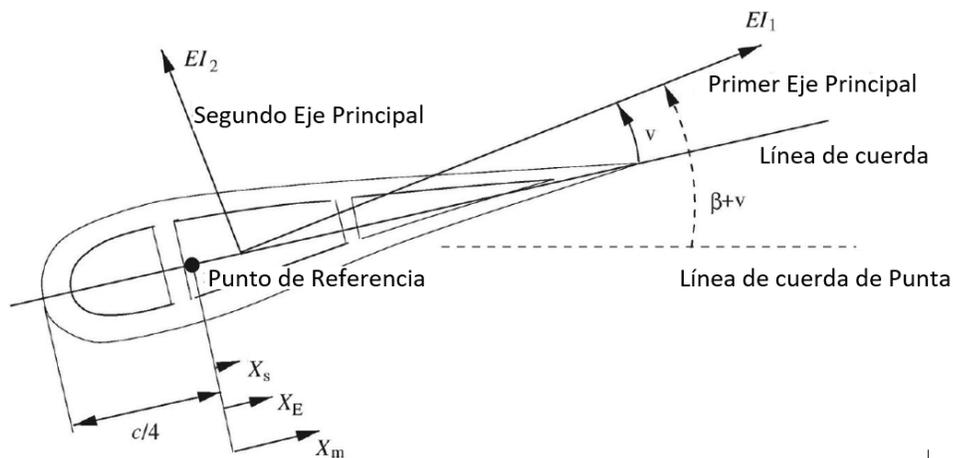
Un álabe se puede asumir como una viga en voladizo, la cual presenta una rigidez compuesta por las propiedades mecánicas del material como el módulo de elasticidad, módulo de corte y la inercia de la sección del álabe. El análisis de la viga se realiza en diferentes puntos con respecto al punto de giro, tomando en cuenta que la sección del álabe va disminuyendo conforme se aleja del eje de rotación del rotor, el tomar una sección arbitraria. [23] [42]

Para determinar la deflexión y esfuerzos en viga es necesario tener los siguientes parámetros como valores de entrada al momento de realizar la simulación dinámica:

- $EI_1$  Rigidez por Flexión alrededor del eje principal.
- $EI_2$  Rigidez por Flexión alrededor del eje secundario.
- $GI_v$  Rigidez torsional.
- $X_E$  Distancia del punto de elasticidad al punto de referencia.
- $X_m$  Distancia del punto del centro de masa al punto de referencia.
- $X_s$  Distancia del punto de centro de corte al punto de referencia.
- $\beta$  Ángulo de desfase entre el eje normal del rotor y el eje normal de línea del álabe.

- $v$  Ángulo entre el eje principal y el normal de línea del álabe
- $v+\beta$  Ángulo entre el eje principal y el eje normal del rotor

El punto de elasticidad es el punto donde una fuerza normal no produciría un momento flector en la viga, es decir, el punto donde los esfuerzos cortantes concentrados no producirían una deflexión por esfuerzos cortantes y no producirían la rotación del álabe. [42] Es una analogía muy similar cuando se tiene un volumen y se desea obtener su centro de masa.



**Figura 1.15** Sección de un álabe mostrando los parámetros estructurales principales  
Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

Los siguientes parámetros son muy importantes para la determinación de la rigidez total del álabe. Los valores siguientes están definidos en base a un sistema de coordenada universal llamado (XR, YR) como se aprecia en la **Figura 1.16**. [43] [23]

$$[EA] = \int_A E dA.$$

**Ecuación 37** Rigidez Longitudinal

Donde:

$E$ = Módulo Elástico longitudinal. (Pa)

$dA$ =Diferencial de área en sección transversal. ( $m^2$ )

$$[ES_{X_R}] = \int_A E Y_R dA.$$

**Ecuación 38** Momento de Rigidez con respecto al eje del rotor X( $X_R$ ).

Donde:

$E$ = Módulo Elástico longitudinal. (Pa)

$dA$ =Diferencial de área en sección transversal. ( $m^2$ )

$Y_R$ =Coordenada Y con respecto al punto de referencia. (m)

$$[ES_{Y_R}] = \int_A E X_R^2 dA$$

**Ecuación 39** Momento de Rigidez con respecto al eje del rotor Y ( $Y_R$ ).

Donde:

$E$ = Módulo Elástico longitudinal. (Pa)

$S_{Y_R}$ =( $m^3$ )

$dA$  =Diferencial de área en sección transversal. ( $m^2$ )

$X_R$ =Coordenada X con respecto al punto de referencia. (m)

$$[EI_{X_R}] = \int_A E Y_R^2 dA$$

**Ecuación 40** Momento de Rigidez de Inercia con respecto al eje del rotor X( $X_R$ )

Donde:

$E$ =Módulo Elástico longitudinal. (Pa)

$I_{X_R}$ =Momento de Inercia con respecto al eje de coordenadas principal x ( $m^4$ ).

$dA$ =Diferencial de área en sección transversal. ( $m^2$ )

$Y_R^2$ =Coordenada Y con respecto al punto de referencia al cuadrado. ( $m^2$ )

$$[EI_{Y_R}] = \int_A E X_R^2 dA$$

**Ecuación 41** Momento de Rigidez de Inercia con respecto al eje del rotor Y( $Y_R$ )

Donde:

$E$ = Módulo Elástico longitudinal. (Pa)

$I_{Y_R}$ = Momento de Inercia con respecto al eje de coordenadas principal y ( $m^4$ ).

$dA$ =diferencial de área en sección transversal. ( $m^2$ )

$X_R^2$ =coordenada X con respecto al punto de referencia al cuadrado. ( $m^2$ )

$$[ED_{XYR}] = \int_A EX_R Y_R dA$$

**Ecuación 42** Momento de rigidez centrífugo.

Donde:

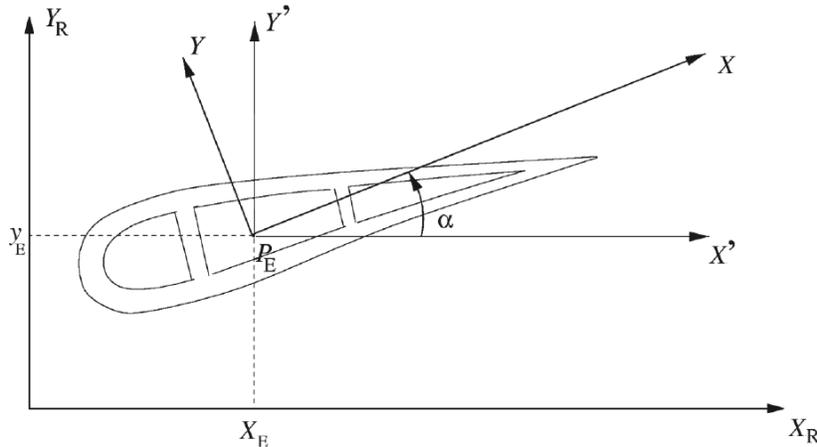
$E$  = Módulo Elástico longitudinal. (Pa)

$D_{XYR}$  = Segundo Momento de Inercia de la sección transversal ( $m^4$ )

$X_R$  = Coordenada X con respecto al punto de referencia. (m)

$Y_R$  = Coordenada Y con respecto al punto de referencia. (m)

$dA$  = diferencial de área en sección transversal. ( $m^2$ )



**Figura 1.16** Sección de un álabe.

Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

Partiendo de los parámetros establecidos se puede determinar el punto de elasticidad  $PE = (X_E, Y_E)$  en el sistema de referencia de coordenadas universal ( $X_R, Y_R$ ):

$$X_E = \frac{[ES_{Y_R}]}{[EA]}$$

**Ecuación 43** Coordenada X de punto elástico.

$$Y_E = \frac{[ES_{X_R}]}{[EA]}$$

**Ecuación 44** Coordenada Y de punto elástico

Para las constantes  $E$  y  $\rho$ , el punto  $(X_E, Y_E)$  es el equivalente al centro de masa para una sección, donde  $\rho$  denota densidad del material usado. Ahora las constantes determinadas previamente las trasladaremos al sistema de coordenadas  $(X', Y')$ , el cual es paralelo al sistema de referencia universal  $(X_R, Y_R)$  y tiene origen en el punto de elasticidad, utilizando las siguientes fórmulas [43]:

$$[EI_{X'}] = \int_A E(Y')^2 dA = [EI_{X_R}] - Y_E^2 [EA]$$

**Ecuación 45** Rigidez por flexión alrededor de las coordenadas universales.

$$[EI_{Y'}] = \int_A E(X')^2 dA = [EI_{Y_R}] - X_E^2 [EA]$$

**Ecuación 46** Rigidez por flexión alrededor de las coordenadas universales.

$$[ED_{X'Y'}] = \int_A EX'Y' dA = [ED_{XY_R}] - X_E Y_E [EA]$$

**Ecuación 47** Momento de rigidez centrífugo alrededor de las coordenadas universales.

De esta manera es posible calcular el ángulo  $\alpha$  entre  $X'$  y el primer eje principal, así como la rigidez por flexión alrededor del eje principal. El segundo eje principal es perpendicular al primer eje:

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2[ED_{X'Y'}]}{[EI_{Y'}] - [EI_{X'}]} \right)$$

**Ecuación 48** Ángulo de desfase entre el eje normal del rotor y el eje de la cuerda del álabe.

$$[EI_1] = [EI_{X'}] - [ED_{X'Y'}] \tan \alpha$$

**Ecuación 49** Rigidez por flexión alrededor de los ejes principales de la sección del álabe.

$$[EI_2] = [EI_{Y'}] + [ED_{X'Y'}] \tan \alpha$$

**Ecuación 50** Rigidez por flexión alrededor de los ejes principales de la sección del álabe.

La distribución de esfuerzos en la sección transversal en un determinado punto del álabe alrededor de los ejes principales, se determina mediante la **Ecuación 51**, la cual establece la relación entre la elasticidad del material ( $E$ ) y las deformaciones ( $\varepsilon$ ). [43]

$$\sigma(x, y) = E(x, y)\varepsilon(x, y)$$

**Ecuación 51** Relación de Esfuerzo Deformación

La deformación es calculada mediante la **Ecuación 52**, en la cual intervienen los momentos flectores alrededor de los ejes principales ya determinados y las fuerzas normales, estos valores se calculan a lo largo de distintos puntos del álabe. Permitiendo obtener los esfuerzos a los cuales se encuentra sometido, para posteriormente evaluarlo dentro de una teoría de diseño de esfuerzos últimos o fatiga. [43]

$$\varepsilon(x, y) = \frac{M_1}{[EI_1]}y - \frac{M_2}{[EI_1]}x + \frac{N}{[EA]}$$

**Ecuación 52** Deformación en un elemento de sección del álabe.

Donde:

*Donde:*

$EI_1$ = Rigidez longitudinal con respecto al eje principal 1. ( $N.m^2$ )

$M_1$ =Momento flector con respecto al eje principal 1 ( $N.m$ )

$EI_2$ =Rigidez longitudinal con respecto al eje principal 2. ( $N.m^2$ )

$M_2$ =Momento flector con respecto al eje principal 2 ( $N.m$ )

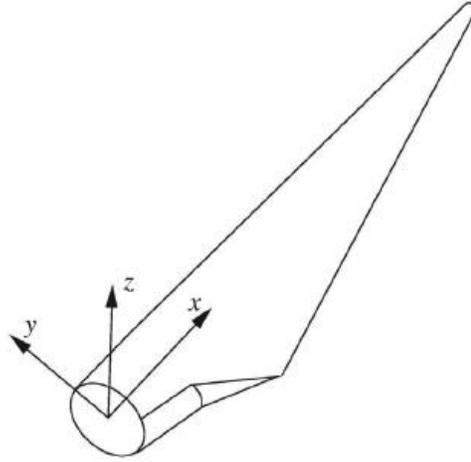
$A$ = Área de sección transversal. ( $m$ )

$N$ =Fuerza Axial en la sección transversal. ( $m^2$ )

### 1.6.3.1 Deflexión y momento flector

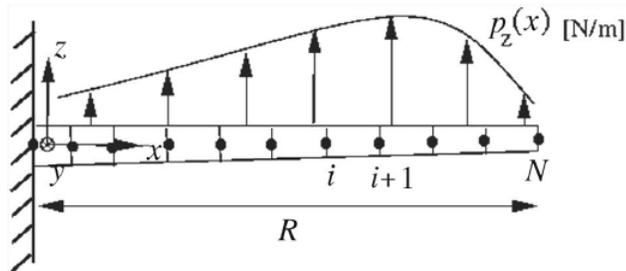
Un álabe de turbina se puede considerar como una viga en voladizo, con punto de empotramiento en el rotor de la turbina eólica como se muestra en la **Figura 1.17** y **Figura 1.18**. Si se tienen representadas las cargas externas  $P_y$  y  $P_z$  (cargas generadas por el arrastre y empuje) conforme a las consideraciones aerodinámicas y aero elásticas establecidas, se

pueden determinar las fuerzas cortantes  $T_z$  y  $T_y$  y los momentos flectores  $M_y$  y  $M_z$  mediante el planteamiento de la ecuación **Ecuación 53** y **Ecuación 54**. [23]



**Figura 1.17** Ala de turbina eólica.

Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]



**Figura 1.18** Diagrama de cargas con discretización de elementos en viga.

Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

$$\frac{dT_z}{dx} = -p_z(x) + m(x)\ddot{u}_z(x)$$

$$\frac{dT_y}{dx} = -p_y(x) + m(x)\ddot{u}_y(x)$$

**Ecuación 53** Ecuación diferencial de cargas cortantes.

Donde:

$p_z(x)$  = Carga distribuida en el ala con respecto al eje z. (N/m)

$p_y(x)$  = Carga distribuida en el ala con respecto al eje y. (N/m)

$\ddot{u}_z(x)$ =Aceleración inercial del álabe en el eje z. (1/s<sup>2</sup>)

$\ddot{u}_y(x)$ =Aceleración inercial del álabe en el eje y. (1/s<sup>2</sup>)

$m(x)$ =masa del álabe en función del radio. (kg/m)

$$\frac{dMy}{dx} = Tz$$

$$\frac{dMz}{dx} = -Ty$$

**Ecuación 54** Ecuación diferencial de fuerzas de empuje y arrastre.

Donde:

$My$ =Momento flector con respecto al eje y. (N.m)

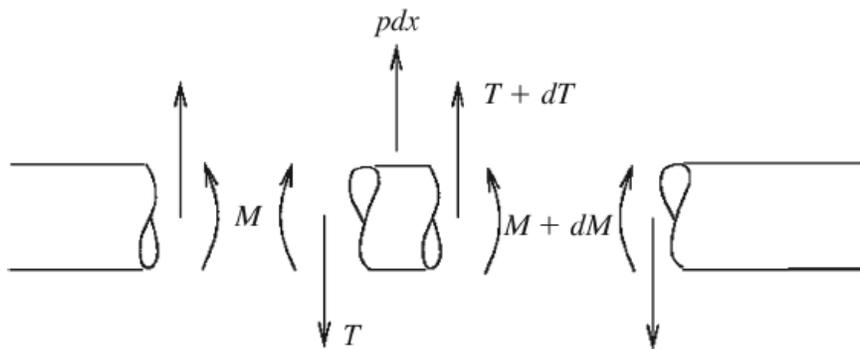
$Mz$ =Momento flector con respecto al eje z. (N.m)

$x$ = Coordenada x a lo largo del álabe. (m)

$Tz$ =Carga cortante con respecto al eje z. (N)

$Ty$ =Carga cortante con respecto al eje y. (N)

Las ecuaciones planteadas se pueden extraer de la segunda ley de Newton en un elemento infinitesimal de la viga mostrada.  $\ddot{u}$  es la aceleración del álabe y si el álabe se encuentra en equilibrio, el último término de la **Ecuación 53** es cero.



**Figura 1.19** Elemento infinitesimal de una viga  
Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

Los momentos flectores alrededor del eje de coordenadas principales se pueden determinar mediante la **Ecuación 55** y **Ecuación 56**. Estas ecuaciones toman en consideración los ángulos de desfase entre las coordenadas universales y los ejes principales como se muestra en la **Figura 1.15**. El ángulo  $\beta$  según la **Figura 1.16** es negativo. Sin embargo, en las **Ecuación 55** se toman como valores positivos. [43]

$$M_1 = M_y \cos(\beta + v) - M_z \sin(\beta + v)$$

$$M_2 = M_y \sin(\beta + v) + M_z \cos(\beta + v)$$

**Ecuación 55** Momentos flectores alrededor de los ejes de coordenadas principales

Donde:

$(\beta + v)$  = Ángulo de desfase entre el eje de coordenadas principales y los ejes principales del álabe.

$M_y$  = Momentos flectores alrededor del eje y de coordenadas principales.

$M_z$  = Momentos flectores alrededor del eje z de coordenadas principales.

Los desplazamientos o curvaturas alrededor de los ejes principales se extraen de la teoría de vigas:

$$k_1 = \frac{M_1}{EI_1}$$

$$k_2 = \frac{M_2}{EI_2}$$

**Ecuación 56** Constantes adimensionales de curvatura

Donde:

$M_1$  = Momentos flectores alrededor del primer eje principal del álabe.

$M_2$  = Momentos flectores alrededor del segundo eje principal del álabe.

$EI_1$  = Rigidez transversal alrededor del primer eje principal del álabe.

$EI_2$  = Rigidez transversal alrededor del segundo eje principal del álabe.

Estas curvaturas se tienen que transformar de nuevo en los ejes principales Y, Z con las **Ecuación 57**.

$$k_z = -k_1 \sin(\beta + v) - k_2 \cos(\beta + v)$$

$$k_y = k_1 \cos(\beta + v) + k_2 \sin(\beta + v)$$

**Ecuación 57** Ecuaciones de curvatura alrededor de los ejes principales

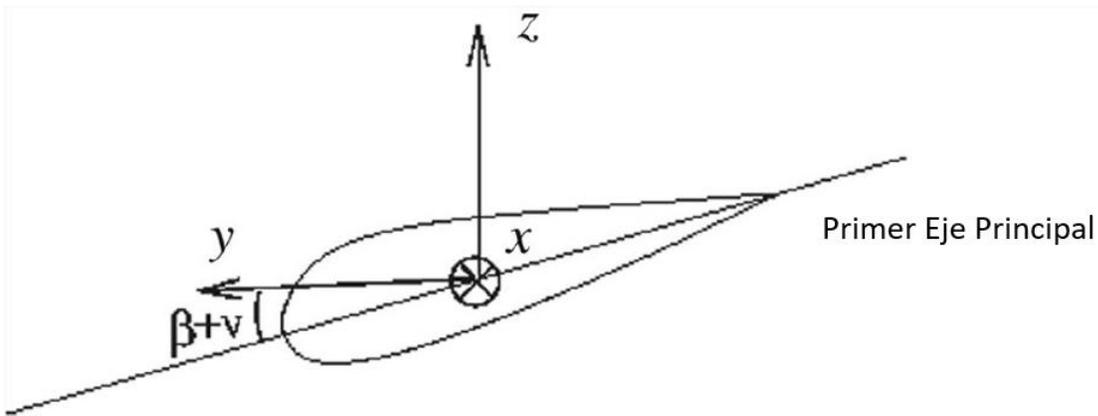
Donde:

$k_1$  = Constante de curvatura alrededor del primer eje principal del álabe.

$k_2$  = Constante de curvatura alrededor del segundo eje principal del álabe.

$(\beta + v)$  = Ángulo de desfase entre el eje de coordenadas principales y los ejes principales del álabe.

A partir de los desplazamientos se pueden determinar las deformaciones angulares y la deflexión utilizando las **Ecuación 58**.



**Figura 1.20** Orientación de los Ejes Principales.

Fuente: Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

$$\frac{d\theta_z}{dx} = k_z$$

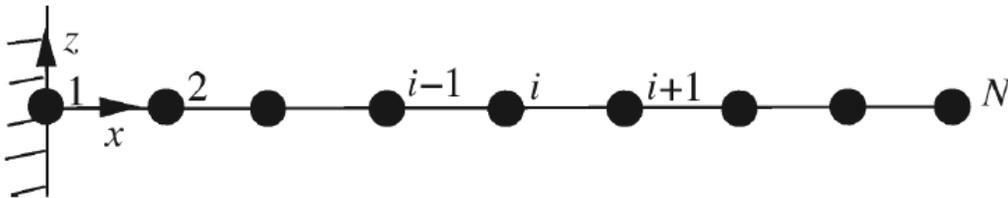
$$\frac{d\theta_y}{dx} = k_y$$

$$\frac{du_z}{dx} = -\theta_y$$

$$\frac{du_y}{dx} = -\theta_z$$

**Ecuación 58** Ecuaciones diferenciales de Desplazamientos y Rotaciones.

Las cargas se encuentran dadas en un determinado punto a lo largo de la viga discretizada en un número N de elementos como se muestra en la **Figura 1.21**. Estas cargas varían en cada elemento correspondientemente, los valores pueden ser integrados a manera de brindar una gráfica de deformación y momentos correspondientes realizando algoritmos numéricos. [23]



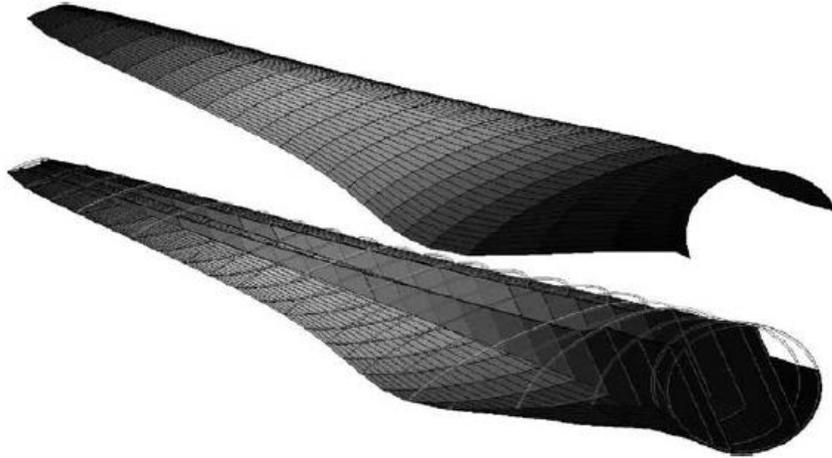
**Figura 1.21** Viga en Voladizo discretizada en elementos.  
Fuente: Martín O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbine. [23]

## 1.7 Modelamiento de Álabes de turbina eólica horizontal con FEM

El modelamiento Aero elástico de turbinas eólicas es la técnica computacional acoplada a la respuesta estructural e inercial de las aspas. En base a la normativa IEC 61400-2, se establece que para determinar las cargas de diseño se pueden utilizar tres métodos: Experimentales, simulaciones Aero elásticas o una metodología simplificada. Esta última resalta por ser muy conservadora. El presente estudio resalta el uso de simulaciones Aero elásticas para la determinación de cargas y su posterior verificación, brindando un diseño menos conservador. [17]

El modelamiento del álabes de turbina eólica utilizando el método de elementos finitos puede variar con respecto a criterio del diseñador, en ciertos escenarios [44] [45]. Se han utilizado los softwares ANSYS en conjunto con NuMAD y NISA II, para el análisis estructural mediante elementos finitos. Los elementos comúnmente utilizados son de tipo placas 2D de compuestos laminados o sándwich laminados 2D. El método de simulación

permite que el diseño demuestre un nivel de detalle posible con un análisis tridimensional, el cual se requiere debido a que durante un análisis bidimensional hay aspectos que no se tienen en consideración, además permite agilizar y simplificar el análisis de los álabes. [46]



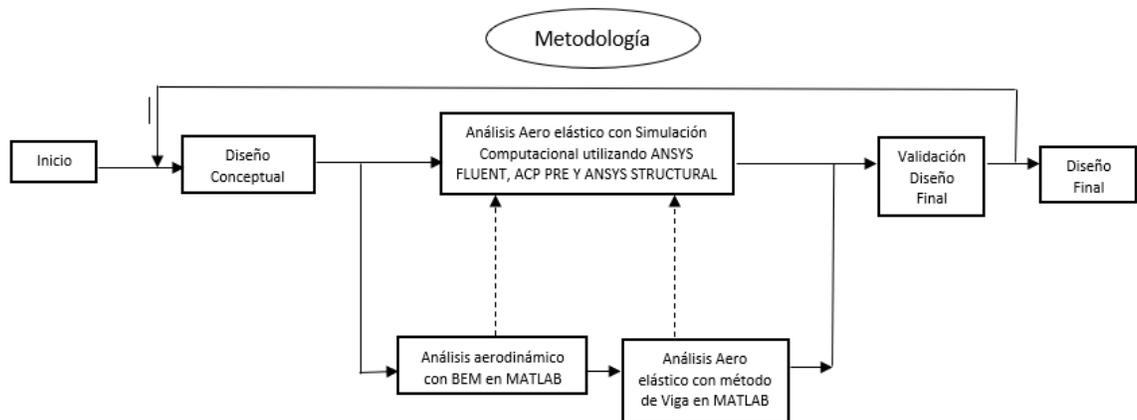
**Figura 1.22** Modelamiento estructural de cáscaras de álabes de turbina eólica.  
Fuente: M. Jureczko. Optimisation of wind turbine Blades. [44]

El software ANSYS con su módulo de generación de compuestos (ACP) permite el modelamiento de materiales compuestos en geometrías tipo placa 2D, estableciendo el número de láminas de compuestos y su orientación de fibras determinando el espesor del compuesto final, para posteriormente realizar un análisis estructural y obtener la distribución de esfuerzos y deformaciones que presenta la geometría a nivel de laminar.

## 2 CAPÍTULO II METODOLOGÍA

La metodología planteada en el presente trabajo permite poder obtener una mejor solución para el diseño de un álabe, validando el diseño conceptual inicialmente planteado en base a diseños previos mediante modelos analíticos. Esta validación se realizó en contraste con la simulación computacional, lo cual permitió realizar un cálculo a mayor detalle tomando en consideración parámetros como el comportamiento del fluido con turbulencia, así como una evaluación del comportamiento del álabe en un espacio tridimensional, en comparación con el cálculo analítico, el cual se limita a evaluar el álabe como un elemento unidimensional.

Asimismo, los resultados obtenidos y validados con la teoría del método analítico se evaluaron sobre la normativa internacional de diseño de turbinas pequeñas IEC61400-2, la cual permite obtener un diseño estandarizado.



**Figura 2.1** Diagrama de Flujo de Metodología Utilizada.  
Fuente: Elaboración Propia.

## 2.1 Diseño Conceptual del Álabes de 5kW

### 2.1.1 Velocidad del Viento

Uno de los primeros parámetros aerodinámicos a determinar es la velocidad del viento, la cual nos proporciona información acerca del potencial energético presente en el lugar de instalación de nuestra turbina, para poder convertirla en energía mecánica. La comunidad de Ayahuasán, del Distrito de Pomacocha, Provincia de Acobamba, Departamento de Huancavelica, se encuentra ubicada en las coordenadas  $12^{\circ} 53' 54.1$  mN y  $W 74^{\circ} 30' 45.7''$  mE a 3150 m.s.n.m [47]. Utilizando esta información se recurrió a la base de datos eólicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senahmi) para poder extraer las velocidades de viento en el periodo correspondiente al 2018, estas velocidades se encuentran en el **Anexo 1**. La estación seleccionada fue la de Acobamba, la cual se encuentra ubicada a 4 km de la comunidad en estudio en la ciudad de Acobamba, Distrito de Pomacocha, Provincia de Acobamba, Departamento de Huancavelica [48]; presentando las mismas condiciones geográficas y climáticas que la comunidad de Ayahuasán.

### 2.1.2 Parámetros Geométricos

La velocidad del viento se determinó en el acápite anterior, permitiendo establecer una velocidad de la zona nominal en la comunidad de Ayahuasán. Por otro lado, el ratio de velocidad máxima, para fines de estas tesis se estableció con un valor de 8. De esta forma se pudo determinar la velocidad angular del rotor, la cual nos permitió determinar los factores aerodinámicos para establecer las cargas en el álabes.

El número de álabes seleccionado para la turbina fue el estándar de 3 álabes tomando como referencia los modelos existentes [27] [26]. El área de barrido del rotor del álabes considerando los parámetros establecidos para una turbina de 5kW nos proporciona un valor de  $57 \text{ m}^2$ , el cual acorde a la normativa internacional, se encuentra dentro de las turbinas eólicas pequeñas. En la **Tabla 2.1** se pueden apreciar los valores de los parámetros de diseño inicial establecidos.

Parámetro	Valor
Velocidad del Viento Nominal (m/s)	5

Ratio de Velocidad máxima	8
Velocidad Angular del Rotor (rad/s)	6.51
Numero de Álabes del Rotor	3
Longitud del Álabes (m)	4
Área de Barrido (m <sup>2</sup> )	57
Longitud de Cuerda en la punta del Álabes (m)	0.085
Longitud de cuerda Máxima al 25% de su longitud. (m)	0.36
Máximo Angulo de Giro del Álabes (°)	24

**Tabla 2.1** Parámetros de Diseño del Álabes

Fuente: Elaboración Propia

Se distribuyeron las secciones de los perfiles aerodinámicos en 26 secciones aerodinámicas, contando la sección circular de la base. Luego se realizó una interpolación entre los perfiles aerodinámicos para determinar los valores de longitud de cuerda y ángulo de inclinación. De esta manera se pudo realizar la proyección de los mismos para su posterior análisis.

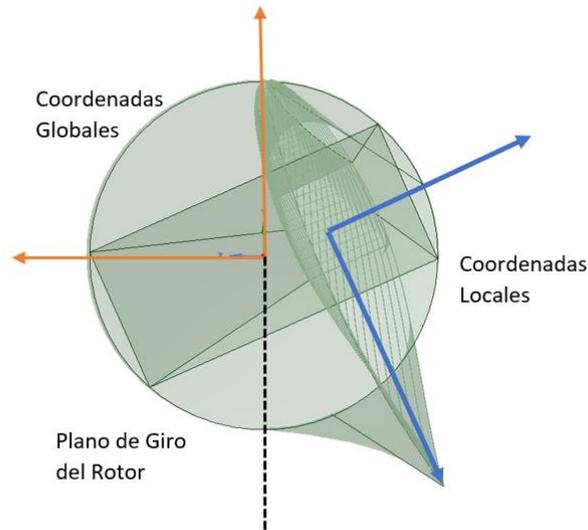
Los valores de coeficientes de arrastre y empuje, se extrajeron de la base de datos [49], donde se tomaron los valores de los Perfiles aerodinámicos NACA 63(2)-218 y NACA 64(4)-221. Estos valores varían en función del número de Reynolds, el cual a su vez varía en función de la longitud de la cuerda. Por lo tanto, se realizó la iteración para cada sección tomando su número de Reynolds independiente y calculando sus respectivos coeficientes aerodinámicos. Las coordenadas paramétricas para la generación de los perfiles se encuentran en el **Anexo 2** del presente documento.

Por último, para determinar el espesor de la pala del álabes se estableció el valor de 5% de la longitud de la cuerda desde la longitud máxima de cuerda hasta la punta del álabes y 25% de la longitud de la cuerda desde la raíz del álabes hasta la longitud máxima, debido a que esta está sometida a mayores cargas [27], lo cual es lo recomendado para un primer diseño base, el mismo que variará de requerirse incrementar la rigidez del álabes.

### 2.1.3 Sistema de Referencia

A manera de facilitar la compatibilización entre los resultados analíticos y computacionales se establecen las cargas de arrastre, empuje locales y globales, como se detalla en la **Figura 2.2** las coordenadas locales corresponden a los ejes principales del

alabe las cuales se utilizan para el cálculo de parámetros aerodinámicos analítico, así como esfuerzos. Sin embargo, los resultados obtenidos mediante simulación se encuentran en coordenadas globales, por lo cual al realizar la comparación se hará referencia a las mismas.



**Figura 2.2** Sistema de Referencia en coordenadas Globales y locales  
Fuente: Elaboración Propia

## 2.2 Determinación de Disposición de Láminas de Compuesto de *Stipa Obtusa*

Los laminados de compuestos de *Stipa Obtusa*, se fabrican en una dirección inicialmente, obteniendo un compuesto laminado con fibras unidireccionales. Sin embargo, el álabe de turbina eólica está sometido a distintas cargas aerodinámicas en varias direcciones; por lo tanto, las cáscaras superior e inferior del álabe se encuentran compuestas con laminados unidireccionales, con orientaciones de las fibras variadas, permitiendo obtener un mejor aprovechamiento de las propiedades del material.

Para el método de viga, debido a que es un método de elementos finitos de 1D considerando el álabe como una viga con una longitud y una determinada sección transversal, se utilizaron solo las propiedades elásticas transversales del laminado de compuesto; por lo cual los resultados presentan cierta variación con respecto a la

simulación computacional, la cual evalúa las propiedades ortogonales del compuesto por elemento infinitesimal tridimensional.

Las propiedades del material compuesto final fueron determinadas en el software ANSYS ACP PRE se encarga de realizar el cálculo y se determinó la orientación de cada lámina de fibra con matriz, insertando las propiedades independientes de cada lámina de compuesto descritas en el acápite 1.4.3.3 en la biblioteca de materiales de ANSYS. El modelamiento de las fibras se realizó con las 5 capas de láminas de compuesto de *Stipa Obtusa* de 1 mm., teniendo un espesor final de 5 milímetros. La dirección de las fibras se colocaron las Rosetas o eje de coordenadas locales de las superficies sobre las cuales se distribuyeron las láminas de compuesto, de manera que el módulo de elasticidad 1 coincida con el eje de coordenadas X, siendo este eje sobre el cual se desarrollarán la mayor parte de cargas.

La orientación de las fibras que se usó para la configuración inicial del modelo computacional se presenta la **Tabla 2.2**, la configuración propuesta se utilizó brindando mayor rigidez longitudinalmente, en la sección transversal orientado la mayor cantidad de capaz en esa dirección. Asimismo, a manera de brindar resistencia a los esfuerzos cortantes producidos por la torsión del alabe se implementaron capaz en ángulos de 45°, 90° y 135°, estableciendo un material compuesto más homogéneo.

Capas	Grados de Orientación
1er Capa	0.00°
2da Capa	45.00°
3era Capa	90.00°
4ta Capa	135.00°
5ta Capa	180.00°

**Tabla 2.2** Orientaciones de láminas de compuesto  
Fuente: Elaboración Propia.

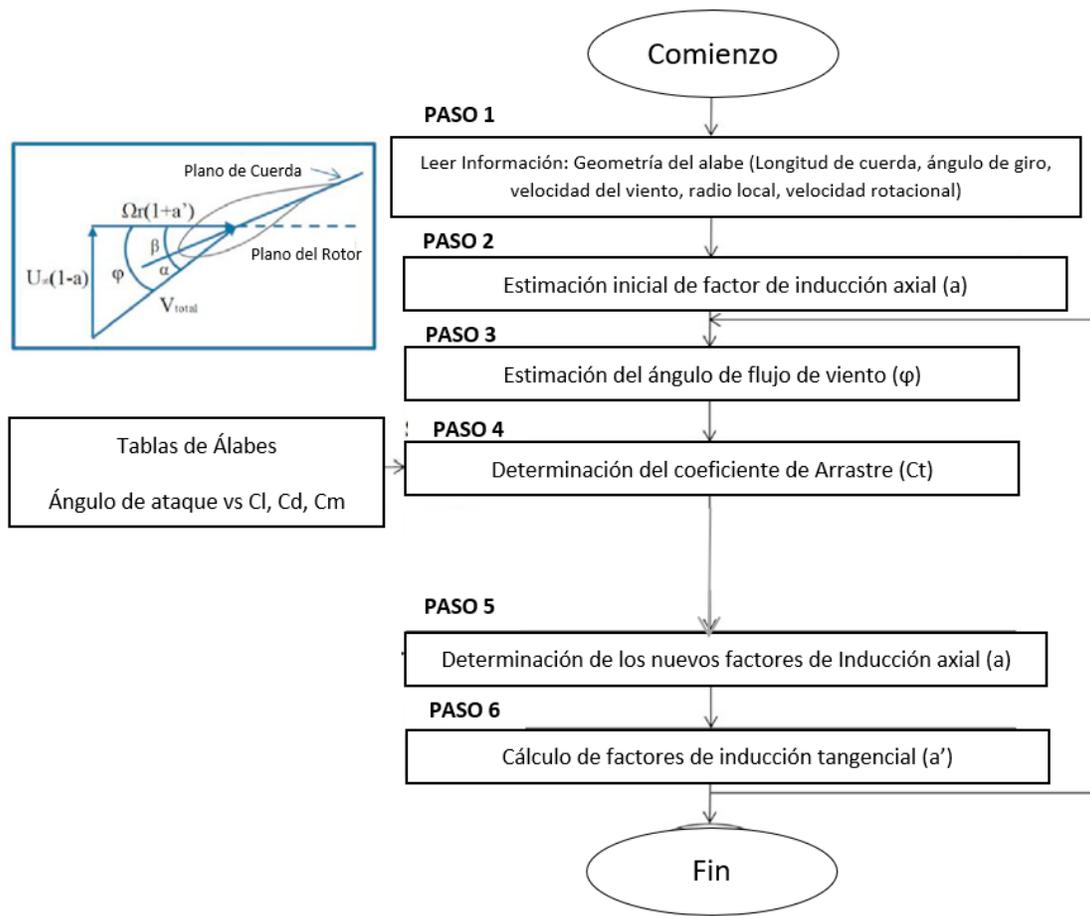
### 2.3 Análisis Aerodinámico con BEM

El método de Momento de Elemento de Álabes (BEM) se utilizó para determinar los parámetros aerodinámicos correspondientes a una sección de perfil. Estos parámetros se obtuvieron a través de iteraciones realizadas inicializando los factores de inducción axial

“a” e inducción tangencial “a” en 0, iterando hasta converger en valores nominales, y determinar estos factores mediante la **Ecuación 30**, **Ecuación 31** y **Ecuación 32**. Como siguiente paso se realizó el cálculo del ángulo de flujo de aire utilizando la **Ecuación 17**, para posteriormente calcular el ángulo de ataque de cada sección con la **Ecuación 16**. [23]

Los coeficientes de cargas en las coordenadas globales se calcularon con los coeficientes de empuje y arrastre correspondiente a cada álabe a través de la **Ecuación 20** y **Ecuación 21**. [23]

Por último, se procedió a calcular los valores de las cargas de empuje y arrastre en coordenadas globales, desarrollando las ecuaciones diferenciales **Ecuación 25** y **Ecuación 26**, evaluándola en cada sección aerodinámica. [23] En la **Figura 2.3** se puede apreciar el proceso iterativo para la determinación de los coeficientes aerodinámicos del método BEM. [50]

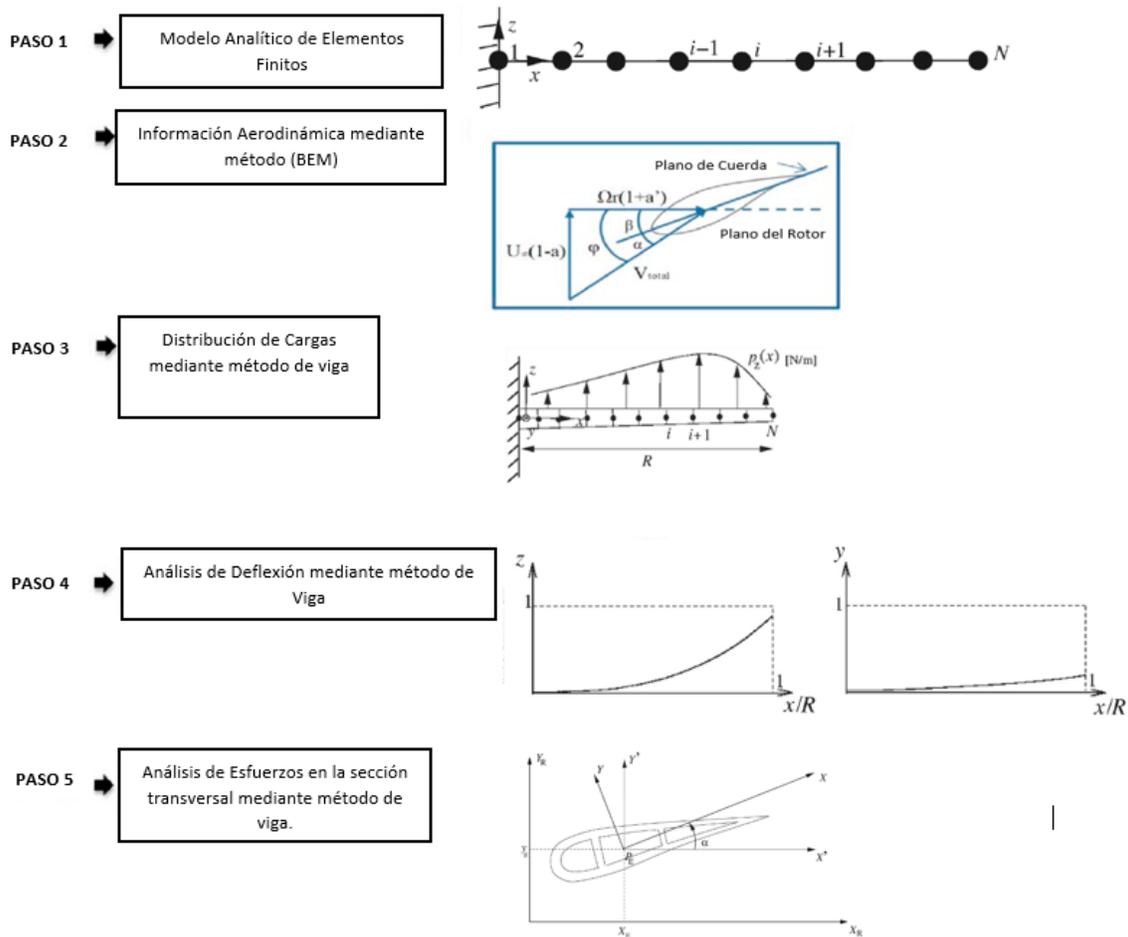


**Figura 2.3** Metodología iterativa del método BEM

Fuente: Elaboración propia en base a Garbine Fernandez, Hodei Usabiaga, Dirk Vandepitte. An efficient procedure for the calculation of the stress distribution in a wind turbine Blade under aerodynamic loads. [50]

## 2.4 Análisis con MATLAB para el Método Teoría de Viga.

Para realizar el análisis analítico estructural del álabe se empleó el método de viga. En conjunto con el software MATLAB se realizó el cálculo de los factores aerodinámicos mediante iteraciones y se resolvieron las ecuaciones diferenciales e integrales. Para la obtención de los esfuerzos y deformaciones del álabe se procedió a realizar la metodología expuesta en la **Figura 2.4**. [23]



**Figura 2.4** Metodología del método de viga.  
Fuente: Elaboración Propia en base a [23] [50]

Como primer paso se procedió a realizar la distribución de los álabes de turbina eólica, estableciendo un modelo analítico de elementos finitos en 1 dimensión, segmentándolo en secciones para evaluar las cargas aerodinámicas en cada sección.

En vista que las secciones aerodinámicas correspondiente a cada elemento unidimensional, no presentan una sección regular, se requiere determinar sus propiedades elásticas e inerciales con respecto a las coordenadas locales de cada sección, para determinar los esfuerzos y deformaciones incidentes en la misma. Para ello, se resolvieron desde la **Ecuación 37** hasta la **Ecuación 47** determinando la rigidez por flexión de las secciones de álabes con respecto a las coordenadas universales y sus centros de elasticidad.

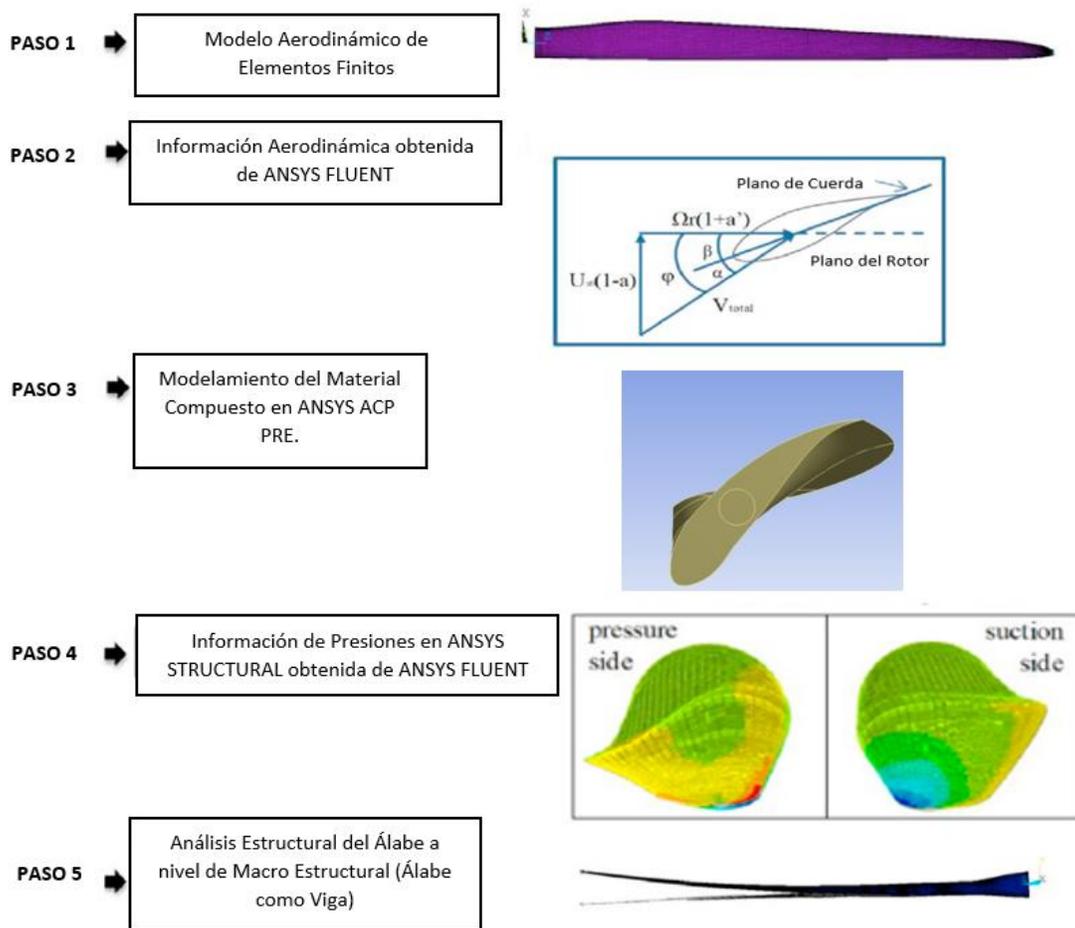
A fin de transformarlas en coordenadas locales se utilizaron la ecuación **Ecuación 48** , **Ecuación 49** y **Ecuación 50** [23], esto se realizado en vista que las propiedades alrededor del álabe se deben evaluar en sus Rigidez alrededor de las coordenadas locales de la sección del álabe.

Utilizando la metodología de BEM expuesta en la **Sección 2.3** se procedió a la obtención de los factores aerodinámicos y consecuentemente las cargas aerodinámicas por longitud, lo cual permitió determinar las cargas en las coordenadas locales de cada sección de álabe con la **Ecuación 53** y **Ecuación 54**. [23]

Por último, se procedió a realizar el análisis de esfuerzos y deflexiones. Primero el análisis de esfuerzos se evaluaron los momentos principales en la rigidez por flexión determinando los esfuerzos en las secciones del álabe mediante la **Ecuación 51** y **Ecuación 52**. Por otro lado, para realizar el análisis de deflexión del álabe se determinaron los coeficientes de curvatura utilizando la **Ecuación 55** y **Ecuación 56**, posteriormente se resolvió la **Ecuación 57** y la **Ecuación 58**, determinando el desplazamiento del álabe en las coordenadas principales “z” e “y”. [23]

## **2.5 Análisis Aero elástico con simulación Computacional**

Para la realización del Análisis computacional, se utilizó el software ANSYS con los módulos Fluent, Estructural y ACP Pre. Para la obtención de los esfuerzos y deformaciones del álabe se procedió a realizar la metodología expuesta en la **Figura 2.5**, [50] adaptándola a las características propias del análisis y se implementaron los módulos de ANSYS ACP PRE, para determinar las interacciones entre capas de laminados de compuestos mediante elementos finitos.



**Figura 2.5** Metodología para análisis Aero elástico con simulación computacional.

Fuente: Elaboración propia en base a Garbine Fernandez, Hodei Usabiaga, Dirk Vandepitte. An efficient procedure for the calculation of the stress distribution in a wind turbine Blade under aerodynamic loads. [50]

### 2.5.1 Análisis aerodinámico con ANSYS FLUENT.

Se realizó el diseño de la geometría, en SPACE CLAIM de ANSYS, importando las coordenadas de las secciones de los álabes, para crear el ábabe de turbina como una superficie con un espesor a determinar posteriori, a manera de simplificar el número de cálculos a realizar en las simulaciones, disminuir errores y permitir un cálculo más uniforme.

Una vez definida la geometría del ábabe, es necesario establecer los límites de relevancia para el cálculo en el módulo, en este caso el aire va a interactuar con la

superficie del álabe, por lo tanto, en el SPACE CLAIM se creó el volumen de control con el volumen del álabe sustraído, permitiendo al fluido interactuar con los límites de la superficie del Álabe superior e inferior. Luego se importó en el módulo de ANSYS FLUENT donde se realizó el mallado del volumen de control. Por último, se definieron las superficies para facilitar el establecimiento de las condiciones de contorno y el mallado.

Named Selection	
Fluid	Geometría
Blade	La superficie sustraída del álabe.
Period 1 y Period 2	Uno de las superficies que se encontrarán en rotación.
Inlet e Inlet Top	Superficies por donde ingresará el fluido.
Outlet	La Superficie por donde el fluido saldrá del volumen de control.

**Tabla 2.3** Los grupos de superficies para simulación computacional de Fluidos.  
Fuente: Elaboración Propia.

El mallado se realizó de manera que permita realizar la simulación con un grado de precisión adecuado para la importación de las cargas aerodinámicas al módulo de ANSYS ESTRUCTURAL. Además, se fijaron puntos de inflexión que permiten obtener un perfil de velocidades más adecuado a la curvatura del álabe y consecuentemente resultados más homogéneos. Por último, se realizó una malla del fluido considerando los parámetros que se presentan en la siguiente tabla:

Mallado		
Mallado local	Ubicación	Tamaño
Face Sizing	Blade	7 mm
Inflection	Geometría	1500 mm
	Blade	100 mm
	Transición	1.2
	Numero de Capas	20
	Espesor de inflection	4 mm
Match Control	High	Period 1
	Low	Period 2

**Tabla 2.4** Parámetros de Malla para simulación de Fluidos.  
Fuente: Elaboración Propia.

Luego se establecieron los parámetros de la simulación, para la cual corresponde a un flujo de aire viscoso escogiendo el modelo matemático de k-Omega SST que simula la turbulencia del flujo y la disipación del fluido. Este modelo agrega dos ecuaciones de

energía cinética y de disipación a las ecuaciones de Navier Stokes, el cual es muy usado y muy preciso para el modelamiento de álabes en CFD [51], este modelo ha sido validado en turbinas eólicas y turbo maquinaria con buenos resultados en la predicción de fluidos aerodinámicos [52] Asimismo, el modelo utilizado k-Omega SST es de tipo Reynolds Average Navier Stokes (RANS) el cual es óptimo para la obtención de los coeficientes aerodinámicos de empuje , arrastre a bajos valores de ángulos de ataque [53], así como la obtención de valores más precisos como el gradiente de presiones en las superficies tipo wall.

De esta manera, se establecieron las condiciones de zona, las cuales permitieron simular la rotación del volumen de control en un determinado instante. Con la opción Frame motion, se estableció la rotación del fluido simulando la rotación angular del rotor, el utilizar Frame motion nos permite tener un eje de coordenadas giratorio el cual proporciona el efecto de fuerzas generadas por la aceleración centrípeta y el efecto Coriolis. Para luego proceder a determinar las condiciones de contorno del volumen de control y las interfaces de la malla.

Para las condiciones del contorno se estableció que la velocidad de entrada correspondiente a los valores obtenidos para las condiciones de operación nominal varíe con respecto a los casos de carga establecidos en la normativa IEC 61400-2, que el paso del fluido a través del volumen de control se realice en la entrada y la salida del volumen de control a una presión estática se realice en el outlet.

<b>Setup Fluent</b>		
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Viscoso - k-Omega (SST)</b>	
Material	Air	
Cell zone condition	Frame Motion	
	Rotational speed (rad/s)	6.511
Boundary Conditions	Blade	Wall
	(Inlet- Inlet Top) -Velocity Inlet	Velocidad dependiendo del caso de carga.
	Outlet	Pressure Outlet
	Period 1 y Period 2	Interface

**Tabla 2.5** Parámetros de Condiciones de contorno.  
Fuente: Elaboración Propia.

De esta manera, se establecen las condiciones de contorno en estado estacionario y con un valor límite de 2000 iteraciones para determinar la variación de presiones que se

generan en la superficie del álabe, extrayendo el gradiente de presiones del módulo de ANSYS FLUENT para posteriormente ser importadas al ANSYS STRUCTURAL como una carga de presión.

## 2.5.2 Análisis con ANSYS ACP (ANSYS composite Pre) y ANSYS ESTRUCTURAL

ANSYS ACP el cual es el módulo de ANSYS, que se utilizó para realizar el modelamiento de láminas de compuestos, donde se modeló la orientación de las fibras de refuerzo del compuesto laminado y se determinaron las características que el sándwich de compuesto tendrá.

En el acápite anterior, se realizó el modelamiento de la geometría del Perfil Aerodinámico en SPACE CLAIM. Con ello se procedió a designar las zonas de interés para facilitar el mallado y establecer las láminas de compuesto conforme a la **Tabla 2.6**. Luego se procedió a mallar con el mismo tamaño de elementos utilizados en el módulo de Fluent se expresan utilizando los parámetros de mallado que se muestran en la **Tabla 2.7**.

Named Selection	
Blade	La superficie del álabe
Root	La superficie tubular de la raíz.
Blade_upper_down	La superficie no tubular del álabe.

**Tabla 2.6** Named selection para simulación computacional estructural  
Fuente: Elaboración Propia.

Mallado local	Ubicación	Tamaño
Face Sizing	Blade	7 mm

**Tabla 2.7** Parámetros de Malla para simulación estructural.  
Fuente: Elaboración Propia.

El modelo se incluyó en el módulo de ANSYS ACP en el cual se estableció el espesor de las láminas de compuestos que conforman el álabe con forma de sándwich; permitiendo, incrementar el número de láminas y cambiar las orientaciones de las fibras tomando como base la configuración establecida en la **Tabla 2.2**, estimando así las propiedades promedio del material compuesto tipo sándwich. La inserción de las láminas se realiza hacia dentro de la superficie del álabe, además las fibras se distribuyen de manera paralela con respecto a un sistema de referencia posicionada en el centro interno del álabe, produciendo una mejor distribución a lo largo de los perfiles aerodinámicos.

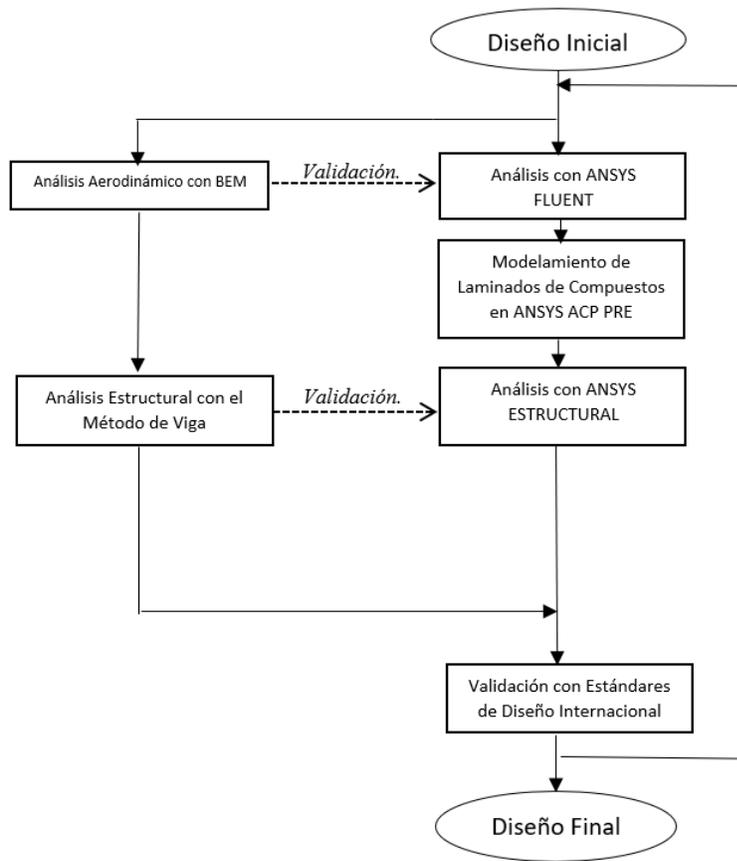
Una vez realizado el modelamiento del álabe en ANSYS ACP Pre se importa la geometría a ANSYS ESTRUCTURAL, teniendo como espesor, el definido en el módulo de ANSYS ACP Pre. Posteriormente, se importó el gradiente de presiones generado por la interacción entre el flujo de aire en la superficie del álabe a través del módulo “system coupling”, importando las presiones desde la Superficie “Blade” del análisis de Fluidos a la superficie “Blade” del análisis estructural.

En el módulo de ANSYS ESTRUCTURAL previo al análisis estructural se definió la velocidad angular de rotación para que el análisis tomara en consideración las cargas centrípetas producidas por el movimiento circular del rotor. Se analizaron los esfuerzos a un nivel macro estructural, viendo los esfuerzos en las secciones transversales del álabe, los puntos concentraciones de esfuerzos y las deformaciones.

## **2.6 Validación de diseño final**

En las referencias [54] [29] [45] [55] [44] [56] se realizaron simulaciones computacionales de elementos finitos para el diseño de álabes de turbinas eólicas; de igual manera se utilizaron modelos computacionales desarrollados en MATLAB como el método de Viga para estimar el comportamiento analítico de un álabe de turbina eólica [50]. Sin embargo, la metodología que se utilizó en el presente trabajo expuesta en la **Figura 2.6**, se realizó para validar los resultados obtenidos de la simulación computacional en comparación con el método analítico realizado en el software MATLAB, obteniendo valores con una mayor certeza.

Por último, se validó los esfuerzos a los cuales se encuentra sometido el álabe con las normas internacionales para turbinas pequeñas respetando los valores de esfuerzos máximos para los criterios de diseño de esfuerzo último y Fatiga en los cuales se evaluó nuestro diseño final. Al no obtenerse un diseño dentro de los parámetros aceptables de las normas internacionales, se incrementó el número de láminas hasta reducir los valores de esfuerzo y las posibles fallas generadas. En la siguiente figura se muestra esquematizado el proceso realizado en la presente tesis.



**Figura 2.6** Metodología para el diseño de un álabe de Material Compuesto  
 Fuente: Elaboración Propia

# 3    CAPÍTULO III

## RESULTADOS

### 3.1    Diseño Conceptual del Álabo

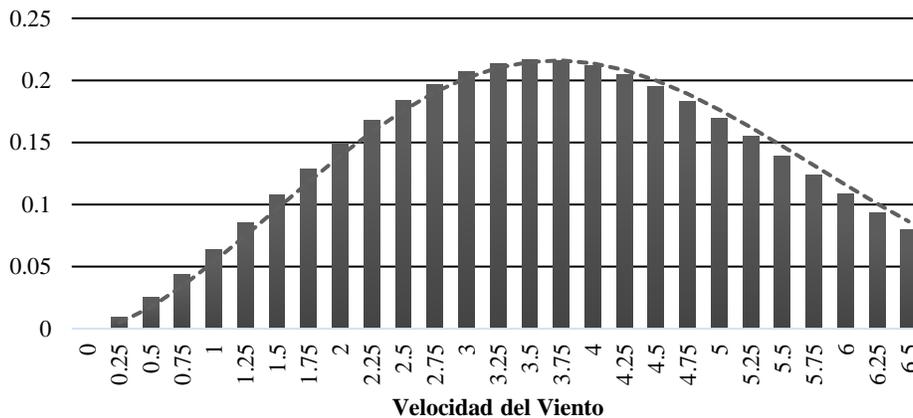
#### 3.1.1    Velocidad del Viento

Para determinar los valores de la velocidad promedio en la zona de Ayahuasán, se utilizó una distribución de Weibull, a manera de obtener un valor nominal correspondiente a la varianza de las condiciones climáticas en el viento. En la **Tabla 3.1** se presentan los parámetros obtenidos de Desviación estándar, valor Promedio, Factor de Forma k y Factor de escala.

Parámetro	Valor
Desviación Estándar (m/s)	1.788803
Velocidad Promedio (m/s)	2.387581
Factor de forma “k”	2.387581
Factor de escala “c”	4.497396

**Tabla 3.1** Perfiles Aerodinámicos a lo largo del álabo.  
Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente, se realizó la distribución de Weibull permitiendo obtener el valor nominal de la zona de Ayahuasán. En la **Figura 3.1**, se puede apreciar dicha distribución, con la cual se obtuvo una velocidad nominal de 3.5 m/s.



**Figura 3.1** Distribución de Weibull para velocidades de viento  
Fuente: Elaboración Propia. [48]

Para el diseño de la turbina se tomó en consideración las situaciones de carga establecidas en la normativa IEC 61400-2, para lo cual se sometió el álabe a condiciones de viento más extremas que la velocidad de viento nominal, obteniendo la distribución de velocidades para cada situación de carga que se detalla en el **Anexo 3**.

Debido a que las velocidades expuestas en los casos de carga varían con respecto al tiempo y el alcance de nuestro estudio se centra en condiciones de funcionamiento estables, se tomaron los valores máximos de Ángulo de incidencia del viento y las velocidades máximas que se muestran en la **Tabla 3.2** para realizar el análisis Aero elástico posterior.

Condiciones de Viento para los casos de carga	Velocidad de Viento (m/s)	Ángulo de Incidencia (°)
Condiciones Nominales	3.5	0
Método de Ráfaga Coherente	18	0°
Método de Ráfaga coherente extrema con cambio de dirección.	18	180°
Ráfaga de Operación Extrema	8.5	0°
Cambio de Dirección Extrema.	3.5	1.88°

**Tabla 3.2** Distribución de Velocidades de Viento para Casos de Carga

Fuente: Elaboración Propia.

Es importante resaltar que para realizar la validación de los cálculos obtenidos mediante simulación computacional se utilizó la velocidad en condiciones nominales.

### 3.1.2 Parámetros Geométricos

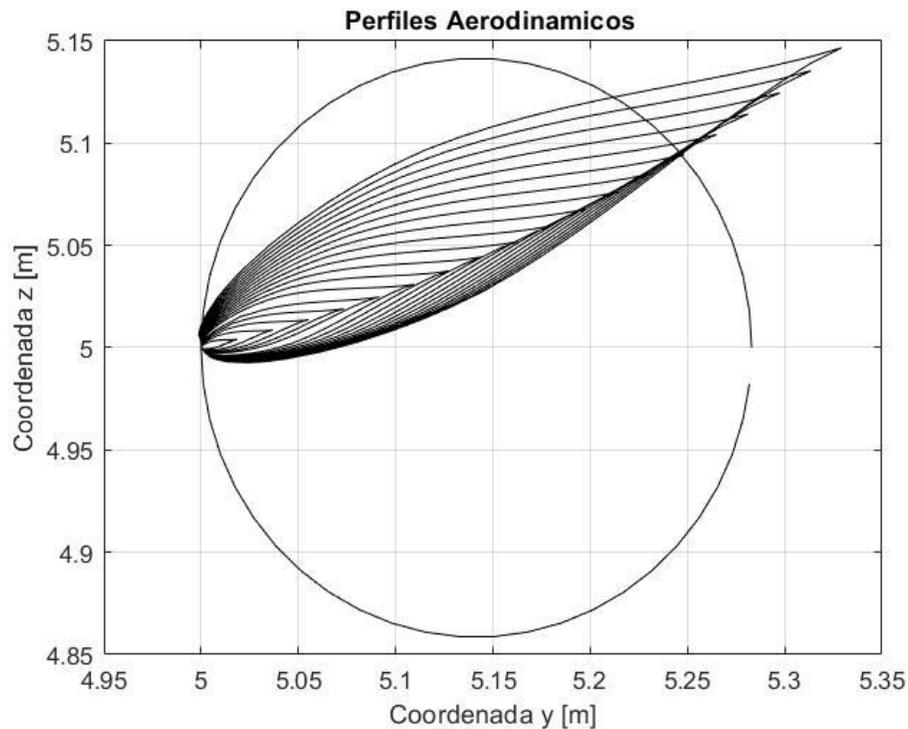
En la **Tabla 3.3** se puede apreciar los parámetros aerodinámicos correspondientes a cada sección de álabe, mientras que en la **Figura 3.2** se puede observar la distribución de perfiles aerodinámicos de manera transversal.

Perfiles Aerodinámicos					
Sección	Distancia del eje de giro (m)	Longitud de Cuerda (m)	Ángulo de Inclinación del Álabe (°)	Espesor de compuesto (m)	Tipo de Perfil
1	0.3000	0.283	0	0.005	-----
2	0.5000	0.283	0	0.005	-----
3	1.2600	0.36	24.0000	0.005	NACA 64(4)-221
4	1.4200	0.34	23.3684	0.005	NACA 64(4)-221
5	1.5800	0.33	22.7368	0.005	NACA 64(4)-221

Perfiles Aerodinámicos					
Sección	Distancia del eje de giro (m)	Longitud de Cuerda (m)	Ángulo de Inclinación del Ábabe (°)	Espesor de compuesto (m)	Tipo de Perfil
6	1.7400	0.31	22.1053	0.005	NACA 64(4)-221
7	1.9000	0.29	21.4737	0.005	NACA 64(4)-221
8	2.0600	0.28	20.8421	0.005	NACA 64(4)-221
9	2.2200	0.26	20.2105	0.005	NACA 64(4)-221
10	2.3800	0.24	19.5789	0.005	NACA 64(4)-221
11	2.5400	0.23	18.9474	0.005	NACA 64(4)-221
12	2.7000	0.21	18.3158	0.005	NACA 64(4)-221
13	2.8600	0.19	17.6842	0.005	NACA 64(4)-221
14	3.0200	0.17	17.0526	0.005	NACA 64(4)-221
15	3.1800	0.16	16.4211	0.005	NACA 64(4)-221
16	3.3400	0.14	15.7895	0.005	NACA 64(4)-221
17	3.5000	0.12	15.1579	0.005	NACA 63(3)-218
18	3.6600	0.11	14.5263	0.005	NACA 63(3)-218
19	3.8200	0.09	13.8947	0.005	NACA 63(3)-218
20	3.9800	0.07	13.2632	0.005	NACA 63(3)-218
21	4.1400	0.06	12.6316	0.005	NACA 63(3)-218
22	4.3000	0.04	12.0000	0.005	NACA 63(3)-218

**Tabla 3.3** Perfiles Aerodinámicos a lo largo del ábabe.

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.2** Distribución de Perfiles Aerodinámicos vista transversal.

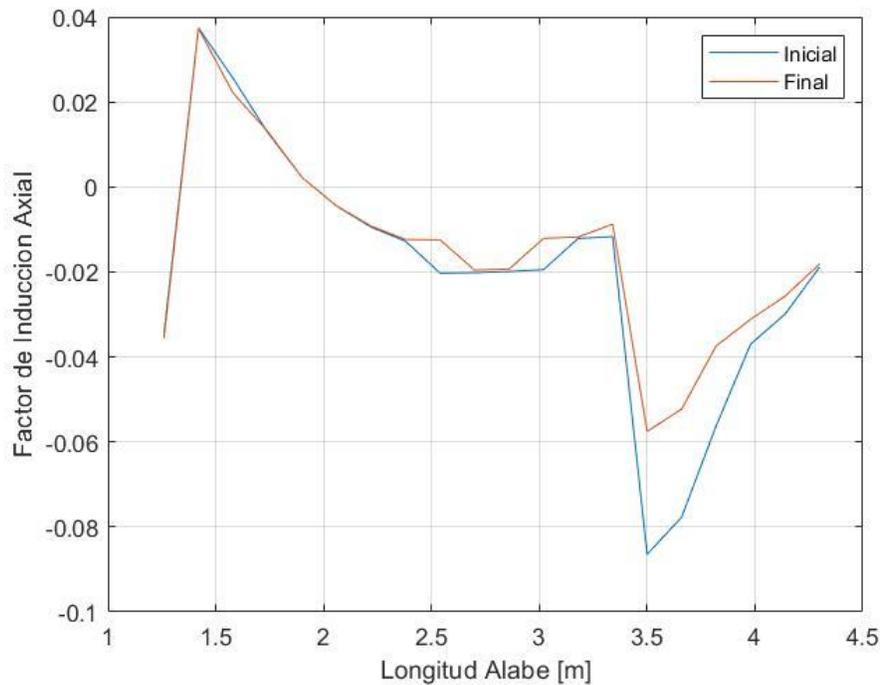
Fuente: Elaboración Propia.

Como se detalla en la **Tabla 3.3**, la distribución de perfiles NACA 64(4)-221 se realizó a lo largo de la zona central del álabe, permitiendo obtener mayor inercia en la zona donde se generan mayores esfuerzos. En contraste en la zona de la punta se escogió un perfil aerodinámico con menos espesor, en vista de que esta zona se encuentra sometida a esfuerzos menores. En la **Figura 3.2** se puede observar la proyección transversal de los perfiles aerodinámicos a lo largo del álabe, su ángulo de inclinación, definiendo el diseño inicial para los análisis posteriores.

### **3.2 Análisis Aerodinámico con BEM**

Mediante la metodología de momento álabe (BEM) se determinaron los coeficientes de inducción tangencial y axial, los cuales son factores que indican la relación de la velocidad del flujo de aire incidente en el rotor y la velocidad local en las secciones de los álabes, siendo un indicador del valor la energía obtenida del aire para el movimiento de los álabes. Estos valores se obtienen a través de un proceso iterativo, hasta obtener valores que converjan a un valor determinado.

Para la obtención de los factores de inducción axial y tangencial se realizaron 10 iteraciones, los valores obtenidos para cada perfil aerodinámico se pueden observar en la **Figura 3.3** y **Figura 3.4**, mientras que los valores finales se detallan en la **Tabla 3.5**.

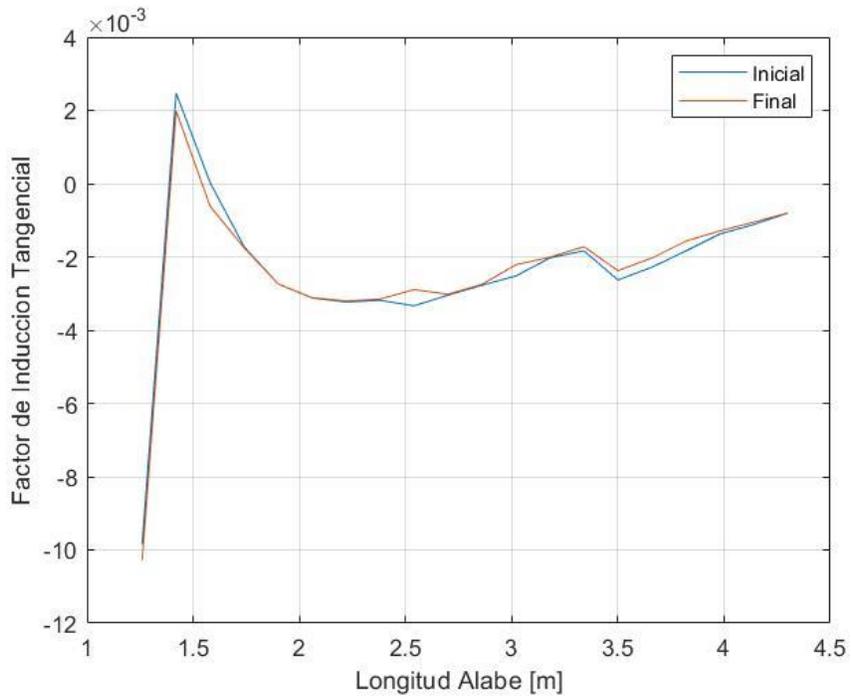


**Figura 3.3** Variación de Factor de Inducción Axial con respecto Iteraciones  
Fuente: Elaboración Propia.

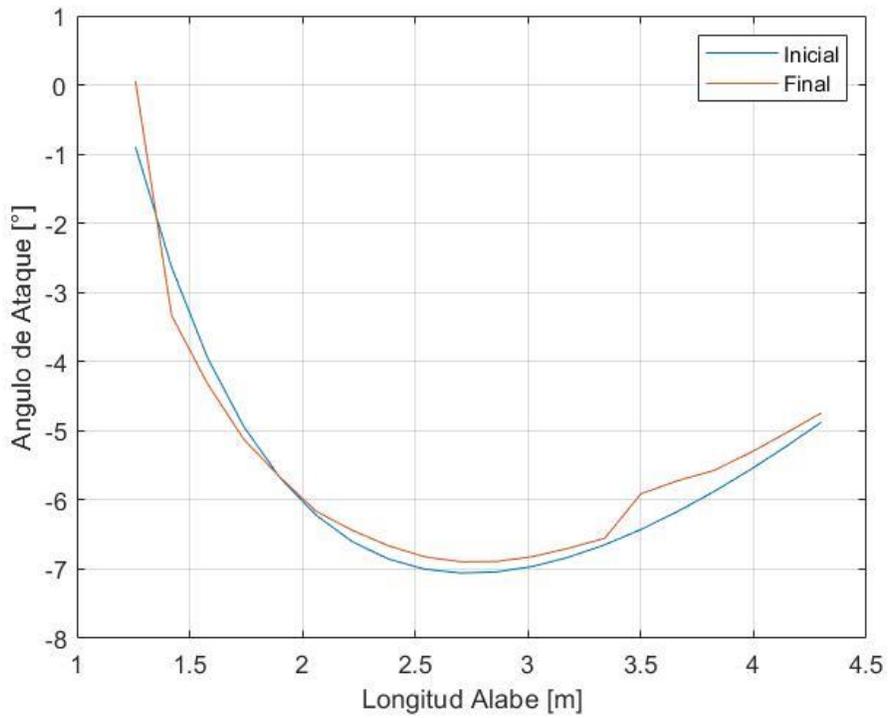
Como se puede observar en la **Figura 3.3**, los factores de inducción axial finales presentan valores máximos 0.0205 y mínimos -0.1599. Sin embargo, los factores obtenidos se encuentran dentro de la teoría de momento debido a que el torque suministrado al rotor así como las demás cargas se calcularon bajo los factores de corrección de Prandtl y Wilson and Walker, los cuales permiten seguir utilizando la teoría de BEM aplicando este método.

En el caso del factor de inducción tangencial, se puede apreciar la tendencia creciente a medida que se acerca al eje de giro, lo cual es lo deseado debido a que las secciones cerca a la raíz soportan la mayoría de las cargas, en adición a ello se produce un cambio de sentido, esto es debido al ángulo de ataque el cual en cierto punto del álabe con mayor longitud de cuerda cambia de sentido a valor positivo.

En adición, el proceso iterativo permite obtener el ángulo de ataque del aire que determina la relación de la distribución de las cargas de empuje y de arrastre a obtener, la variación del factor de inducción tangencial y la variación del ángulo de ataque con respecto a las iteraciones se muestra en la **Figura 3.4** y **Figura 3.5**.



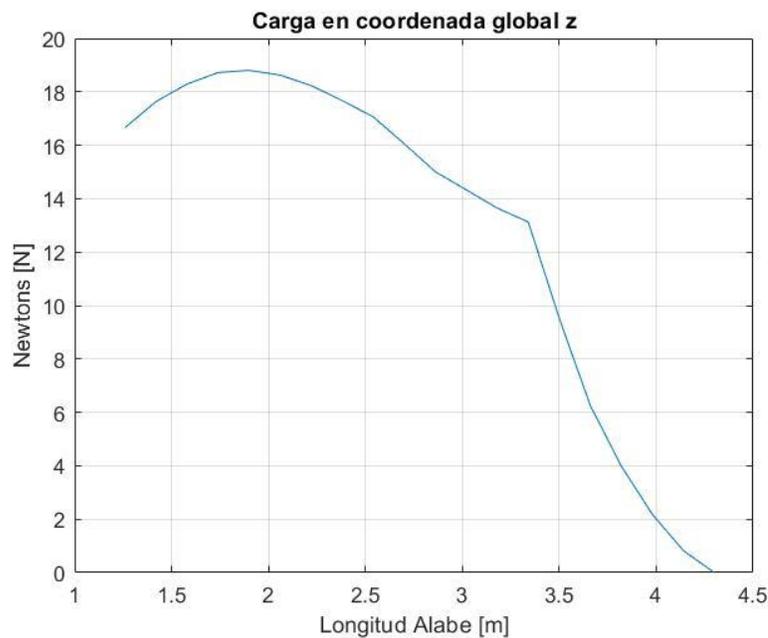
**Figura 3.4** Variación de Factor de Inducción Tangencial con respecto iteraciones.  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.5** Variación de Angulo de Ataque con respecto iteraciones.  
Fuente: Elaboración Propia.

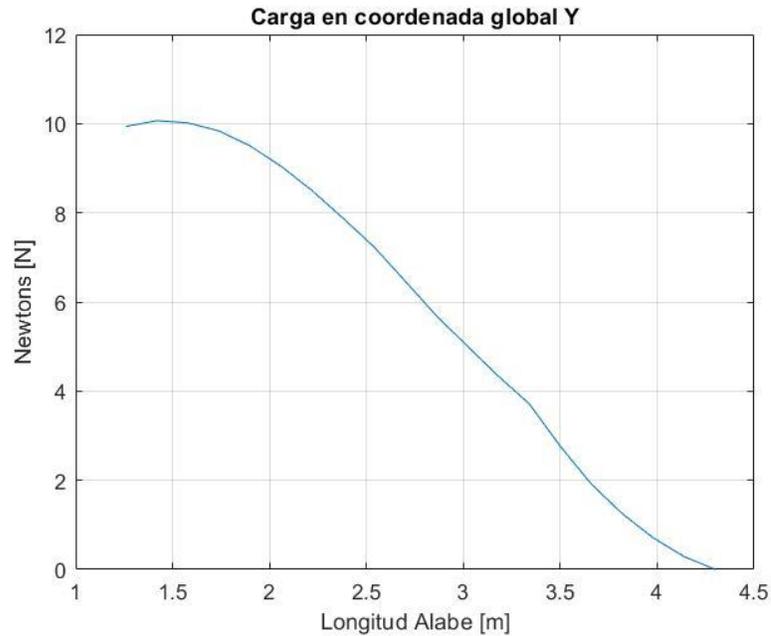
Como se aprecia en la **Figura 3.4**, existe una variación en la curva de los factores de inducción tangencial a 3.5 m de distancia del rotor, esta variación es generada por la variación en los perfiles aerodinámicos, debido a que los coeficientes aerodinámicos son dependientes del tipo de perfil a utilizar. Asimismo, a la distancia de 1.26 m del eje del rotor, se puede apreciar otro cambio de dirección en el factor de inducción axial; esto se debe propiamente al cambio en el ángulo de ataque detallado en la **Figura 3.5** de un valor negativo a positivo debido al ángulo de inclinación del perfil aerodinámico y su variación a través de las iteraciones.

Se realizó el cálculo del torque, así como de las cargas de empuje y arrastre en coordenadas globales, las cuales son importantes para el análisis estructural analítico realizado posteriori. En la **Figura 3.6** y **Figura 3.7** se presentan los valores obtenidos en cada perfil aerodinámico.



**Figura 3.6** Distribución de Cargas de Arrastre en coordenadas globales.  
Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede apreciar, las cargas de empuje en coordenadas globales son inferiores a las cargas de arrastre en coordenadas globales. En la **Tabla 3.4** se expone el valor del torque generado por un álabe.



**Figura 3.7** Distribución de cargas de Empuje en coordenadas globales.  
Fuente: Elaboración Propia.

Torque Generado (N.m)	-29.9
-----------------------	-------

**Tabla 3.4** Torque Generado por un Álabes.  
Fuente: Elaboración Propia

Los valores a detalle correspondientes a cada perfil aerodinámico se exponen en la **Tabla 3.5:**

Perfiles Aerodinámicos							
Sección	Distancia del eje de giro (m)	Longitud de Cuerda (m)	Angulo de Flujo de Aire (°)	Factor de Inducción Axial	Factor de Inducción Tangencial	Fuerza de Empuje en Coord. Globales (N)	Fuerza de Arrastre en Coord. Globales (N)
1	0.3000	0.283	0	0	0	0	0
2	0.5000	0.283	0	0	0	0	0
3	1.2600	0.36	24.0000	-0.0356	-0.0103	9.9371	16.6617
4	1.4200	0.34	23.3684	0.0372	0.0020	10.0661	17.6386
5	1.5800	0.33	22.7368	0.0221	-0.0006	10.0149	18.2926
6	1.7400	0.31	22.1053	0.0131	-0.0018	9.8363	18.7235
7	1.9000	0.29	21.4737	0.0022	-0.0027	9.4986	18.8041
8	2.0600	0.28	20.8421	-0.0045	-0.0031	9.0432	18.6280

Perfiles Aerodinámicos							
Sección	Distancia del eje de giro (m)	Longitud de Cuerda (m)	Angulo de Flujo de Aire (°)	Factor de Inducción Axial	Factor de Inducción Tangencial	Fuerza de Empuje en Coord. Globales (N)	Fuerza de Arrastre en Coord. Globales (N)
9	2.2200	0.26	20.2105	-0.0092	-0.0032	8.4960	18.2361
10	2.3800	0.24	19.5789	-0.0124	-0.0032	7.8763	17.6709
11	2.5400	0.23	18.9474	-0.0125	-0.0029	7.2302	17.0662
12	2.7000	0.21	18.3158	-0.0196	-0.0030	6.4671	16.0568
13	2.8600	0.19	17.6842	-0.0193	-0.0027	5.6934	15.0113
14	3.0200	0.17	17.0526	-0.0121	-0.0022	5.0124	14.3328
15	3.1800	0.16	16.4211	-0.0118	-0.0020	4.3373	13.6488
16	3.3400	0.14	15.7895	-0.0088	-0.0017	3.7149	13.1281
17	3.5000	0.12	15.1579	-0.0575	-0.0024	2.7627	9.5221
18	3.6600	0.11	14.5263	-0.0523	-0.0020	1.9142	6.2557
19	3.8200	0.09	13.8947	-0.0374	-0.0016	1.2499	3.9843
20	3.9800	0.07	13.2632	-0.0311	-0.0013	0.7075	2.1836
21	4.1400	0.06	12.6316	-0.0257	-0.0011	0.2853	0.8226
22	4.3000	0.04	12.0000	-0.0181	-0.0008	0	0

**Tabla 3.5** Factores de inducción, ángulo de flujo y cargas Aerodinámicas Obtenidas mediante BEM.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.3 Selección de Material y Disposición de Láminas de Compuestos en el Álabe

Se realizó la combinación de láminas de fibra de *Stipa Obtusa* colocadas una sobre otra en el software ANSYS, en donde las propiedades utilizadas para cada lámina independiente se extrajeron de la **Tabla 1.6**. El software ANSYS mediante métodos numéricos determina las propiedades promedio del compuesto final, obteniendo valores muy cercanos a las propiedades independientes de las láminas, brindando un mayor módulo elástico en las direcciones 2 y 3.

En la **Tabla 3.6** se puede apreciar las propiedades finales obtenidas del compuesto laminado formado por 5 láminas de 1 mm cada una, de compuesto de Fibra de *Stipa Obtusa* con resina de poliéster. Se puede observar que, con las propiedades obtenidas, el compuesto de 5 mm de espesor presenta mayor módulo elástico en comparación con sus propiedades independientes de lámina de *Stipa Obtusa*. La distribución de las fibras a lo largo del álabe, se detallará en la **Sección 3.5.2**.

Propiedades	Valores
Rigidez Cortante Laminar de Flexión (GPa)	1.8
Rigidez del Laminar de Flexión E1 (GPa)	9.64
Rigidez del Laminar de Flexión E2 (GPa)	4.57
Rigidez Cortante Laminar (GPa)	2.11
Rigidez Laminar E1 (GPa)	7.22
Rigidez Laminar E2 (GPa)	5.93
Módulo Cortante Fuera de Plano G23 (GPa)	1.20
Módulo Cortante Fuera de Plano G31 (GPa)	1.29
Factor de Corrección Cortante k44 (G23)	0.784
Factor de Corrección Cortante k55 (G31)	0.841

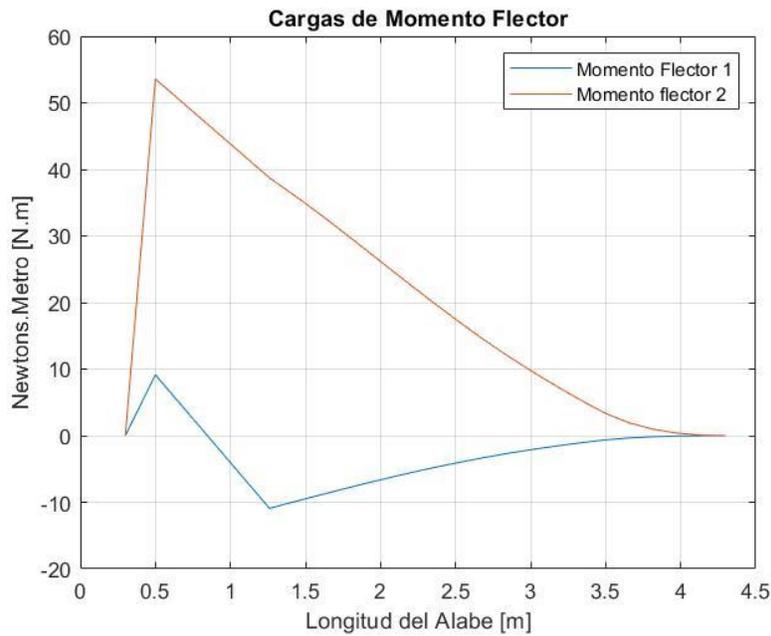
**Tabla 3.6** Propiedades Orto trópicas del Compuesto laminado de Stipa Obtusa 5 mm.  
Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4 Análisis analítico con MATLAB Teoría de Viga

El modelo analítico de la Teoría de Viga utilizado para la determinación de los esfuerzos longitudinales a lo largo del álabe, se plasmó primero determinando la rigidez longitudinal de cada sección del álabe desarrollando las integrales de cada perfil aerodinámico.

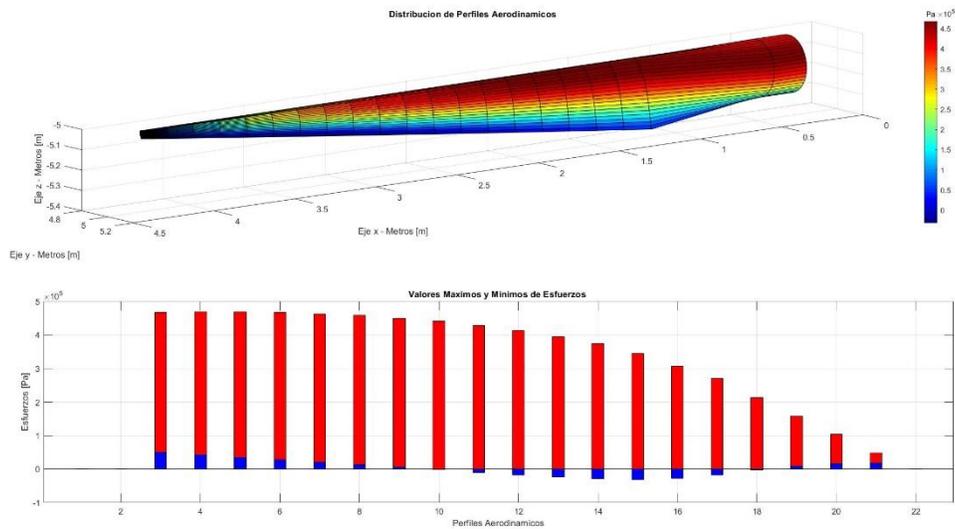
En el cálculo se utilizó el módulo de elasticidad en la dirección 1, que en coordenadas generales corresponderían al eje x, el cual se ubica a lo largo del álabe. Se utilizó esta propiedad debido a que el método de la Teoría de Viga evalúa esfuerzos en la dirección mencionada. Asimismo, para el cálculo se utilizaron las propiedades expuestas en la **Tabla 3.3** correspondientes a cada perfil aerodinámico; además, se utilizaron las cargas aerodinámicas calculadas mediante el método de BEM expuestas en la **Tabla 3.5**. Una vez realizado el cálculo se obtuvieron los valores correspondientes a la rigidez transversal y momentos de inercia de cada perfil aerodinámico. En el **Anexo 4** se exponen los resultados obtenidos para cada perfil Aerodinámico.

Se puede observar que la distribución de las inercias con respecto al eje secundario es mayor en comparación al primero, lo cual es correcto debido a que el eje principal secundario se coloca a lo largo de la cuerda del álabe, siendo esta la longitud la más prolongada, obteniendo una mayor inercia frente a los momentos flectores. En la **Figura 3.8** se puede apreciar la distribución de momentos flectores a lo largo del álabe en las coordenadas locales del álabe.



**Figura 3.8** Distribución de Momentos Flectores a lo largo de los Ejes Principales.  
Fuente: Elaboración Propia.

En base a ello se calculó la distribución de esfuerzos longitudinales a lo largo de los perfiles aerodinámicos del álabo. En la **Figura 3.9** se expone la distribución de esfuerzos longitudinales con sus respectivos esfuerzos máximos y mínimos, los valores positivos corresponden a tracción y los negativos a compresión.



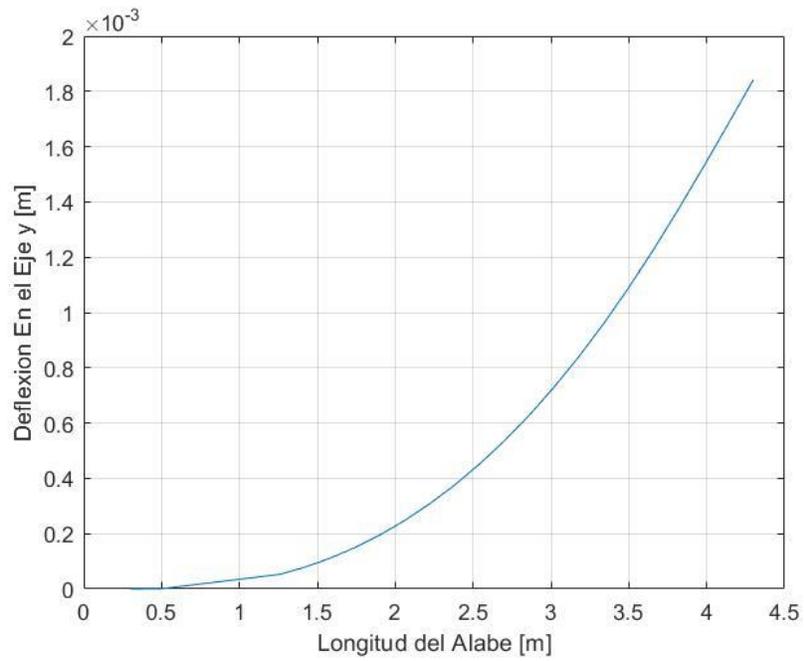
**Figura 3.9** Distribución de Esfuerzos Longitudinales en Álabo en MATLAB.  
Fuente: Elaboración Propia.

Se puede apreciar que la distribución de esfuerzos guarda correlación con lo esperado debido a que las fuerzas de empuje ocasionadas por la diferencia de presión en el rotor, permiten la sustentación de los perfiles aerodinámicos, generando mayor presión en la parte superior y menor presión en la inferior. El sentido de giro con respecto a la imagen mostrado sería con respecto al eje Y. En la **Tabla 3.7** se pueden apreciar los valores correspondientes a los valores máximos y mínimos en cada perfil aerodinámico.

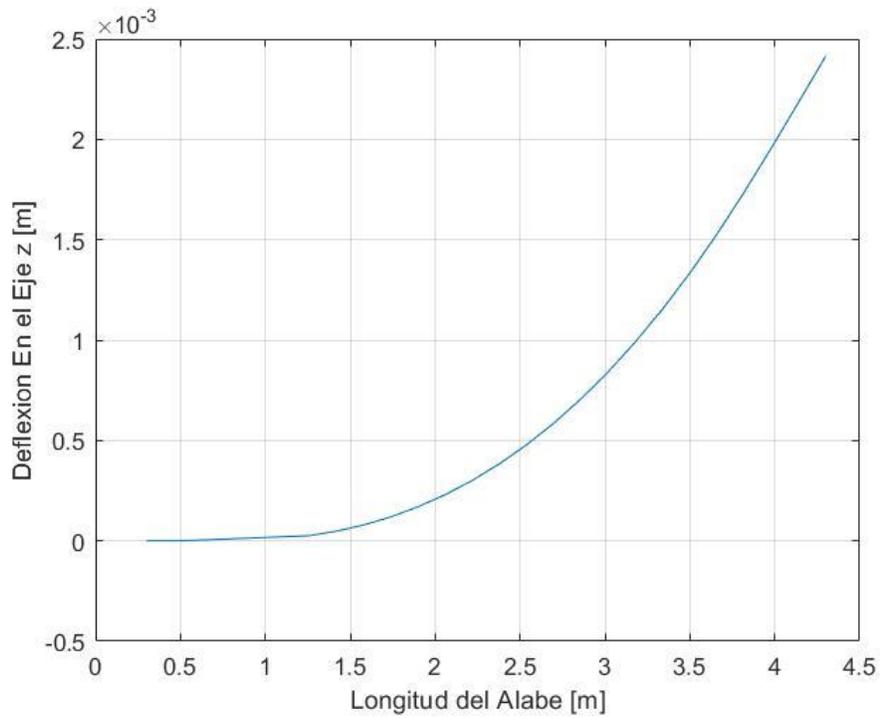
Perfil Aerodinámico	Esfuerzos Máximos (MPa)	Esfuerzos Min (MPa)
3	0.46656	0.04905
4	0.4682	0.042537
5	0.46846	0.035518
6	0.46699	0.028286
7	0.46348	0.020901
8	0.45791	0.013359
9	0.45024	0.005684
10	0.44036	-0.002047
11	0.42803	-0.009656
12	0.41288	-0.016839
13	0.39484	-0.023574
14	0.37306	-0.029196
15	0.34502	-0.031628
16	0.30716	-0.027758
17	0.27036	-0.017149
18	0.21277	-0.00225
19	0.15789	0.008709
20	0.1033	0.016193
21	0.04857	0.017678
22	0	0

**Tabla 3.7** Distribución de esfuerzos máximos y mínimos en los perfiles Longitudinales.  
Fuente: Elaboración Propia.

De igual manera se calcularon los coeficientes de curvatura obteniendo los valores de deflexión máxima en los ejes Y e Z, como se aprecia en la **Figura 3.10** y **Figura 3.11** .



**Figura 3.10** Deflexión del Álabes con respecto al Eje Y  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.11** Deflexión del Álabes con respecto al Eje Z  
Fuente: Elaboración Propia.

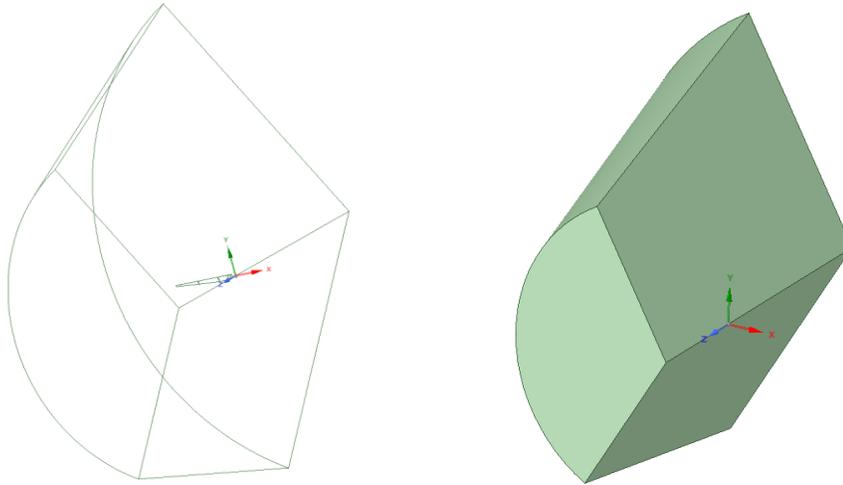
Se puede observar que la deflexión máxima presente en el álabe es de 17.4 mm en el eje Z y de 6.4 mm en el eje Y. La normativa IEC 61400-2 no establece un límite de deflexión máximo para los álabes, siempre y cuando se mantenga la integridad del álabe y no ocurra interferencia entre el álabe con otras estructuras. En base al estudio [57] se determina que el límite de deflexión es el 30% de la distancia entre la punta del álabe y la torre de la turbina, por lo que para fines de esta tesis se estableció que el valor entre la punta del álabe y la torre es de 30 cm. Teniendo como distancia máxima de deflexión 90 mm en el eje Z, con respecto al eje Y no se produce interferencia con otras estructuras, por lo cual se tomó el mismo valor utilizado en el eje Z a manera de homogeneizar el diseño. En la **Figura 3.10** y **Figura 3.11** se valida que la deflexión se encuentra dentro de los límites establecidos.

### **3.5 Análisis Aero elástico con simulación Computacional**

En este acápite se muestran los resultados de simulación computacional mediante el cual se validaron las teorías expuestas previamente para la culminación óptima del diseño utilizado.

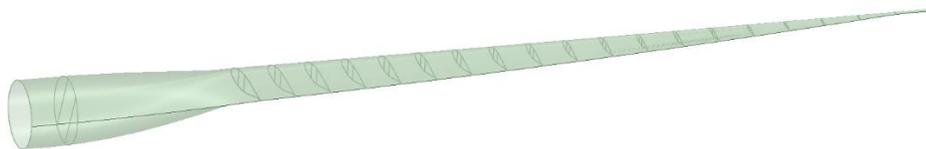
Se realizó el diseño del volumen del control con el volumen ocupado por el álabe sustraído, permitiendo definir el gradiente de presiones generado en la superficie del álabe. En la **Figura 3.12** se plasma la geometría final utilizada como volumen de control mediante el cual se realizó el análisis en ANSYS FLUENT.

to select a solid



**Figura 3.12** Volumen de Control de Aire para Simulación de Fluidos en SPACECLAIM.  
Fuente: Elaboración Propia.

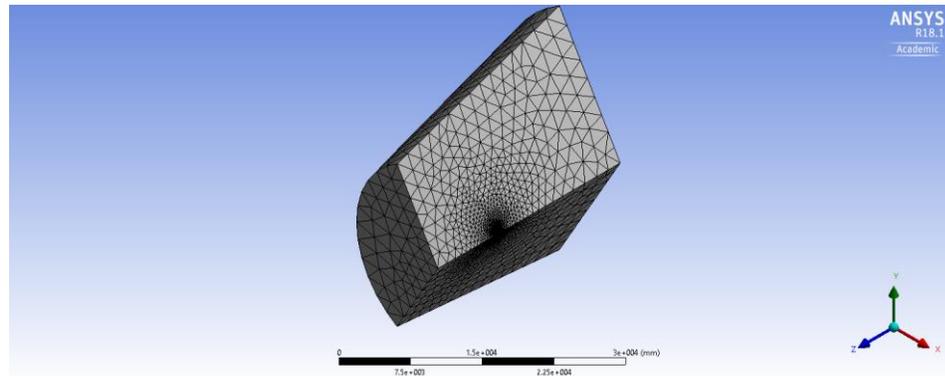
Análogamente se diseñó la geometría del álabes mediante los perfiles aerodinámicos determinados en la **Tabla 3.3**, como una superficie con un espesor a ser determinado en el módulo de compuestos de ANSYS ACP. En la **Figura 3.13** se muestra el diseño conceptual del álabes con los perfiles aerodinámicos y su raíz circular, ambas geometrías se diseñaron en el módulo de diseño SPACE CLAIM, siendo el eje de rotación del rotor el eje Z.



**Figura 3.13** Diseño de álabes como superficie en SPACECLAIM.  
Fuente: Elaboración Propia.

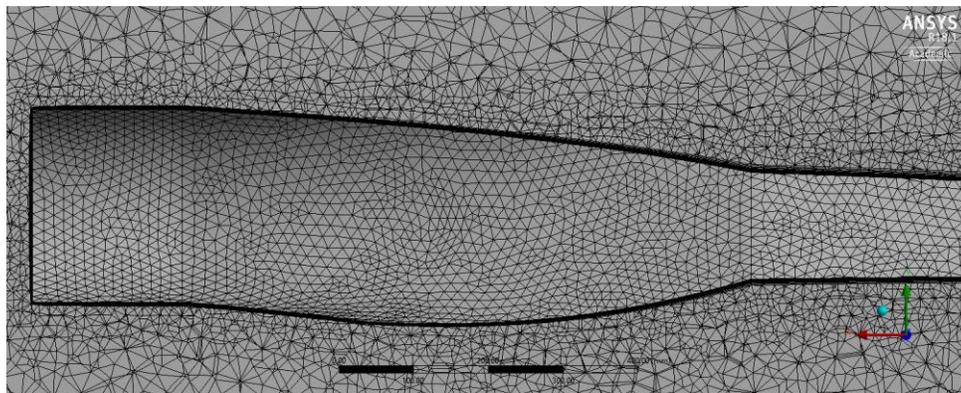
### 3.5.1 Análisis Aerodinámico con ANSYS FLUENT

El mallado del volumen de control expuesto en la **Figura 3.14** presentaba buena relevancia, permitiendo una malla de alta calidad.



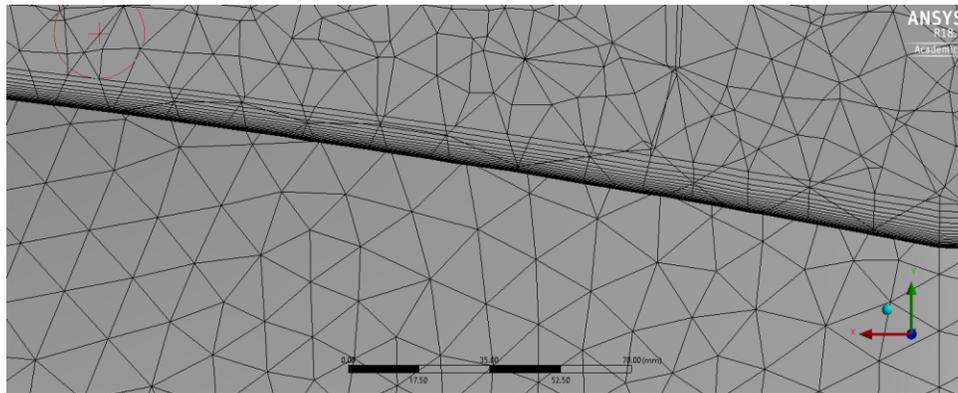
**Figura 3.14** Volumen de Control de Aire mallado.  
Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, en la **Figura 3.15** se detalla el mallado local que se realizó en la sección del álabe, a fin de obtener más información referente al gradiente de presiones.

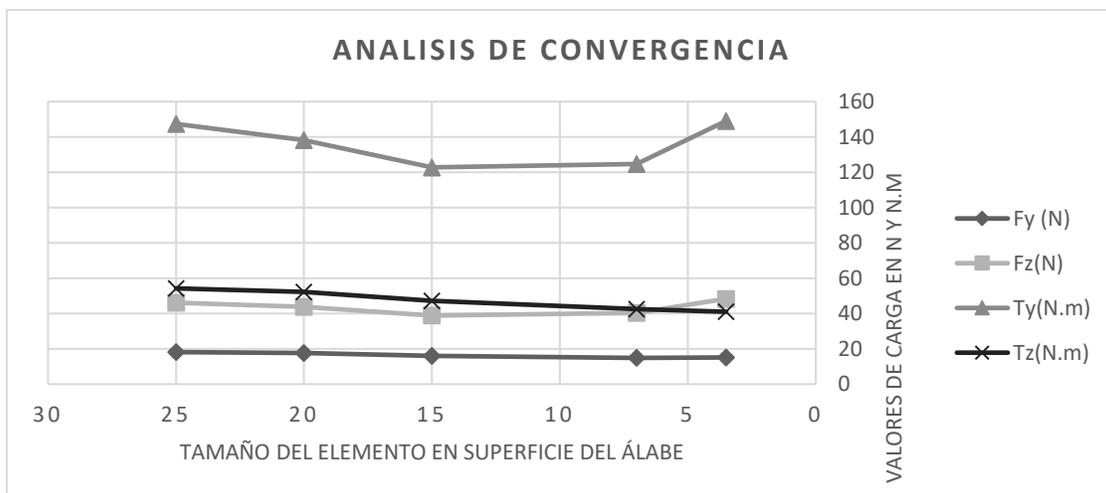


**Figura 3.15** Detalle de Mallado Local en Sección del Álabe.  
Fuente: Elaboración Propia.

Adicionalmente, se implementó el inflection con 20 capas con un valor de espesor de 4 mm, en vista que tenemos una superficie sobre la cual interactuará un fluido permitiendo obtener el perfil de velocidades con mayor precisión y consecuentemente, cargas aerodinámicas más precisas. El detalle se puede observar en la **Figura 3.16**.



**Figura 3.16** Detalle de Mallado tipo Inflection.  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.17** Análisis de convergencia de Malla  
Fuente: Elaboración Propia.

Se realizó el análisis de convergencia expuesto en la **Figura 3.17**, donde se determinó que el valor óptimo, para el cual se puede determinar que los valores obtenidos no dependían del nivel de mallado, obteniendo que las condiciones expuestas en la **Sección 2.5.1** brindaban una solución independiente de la malla.

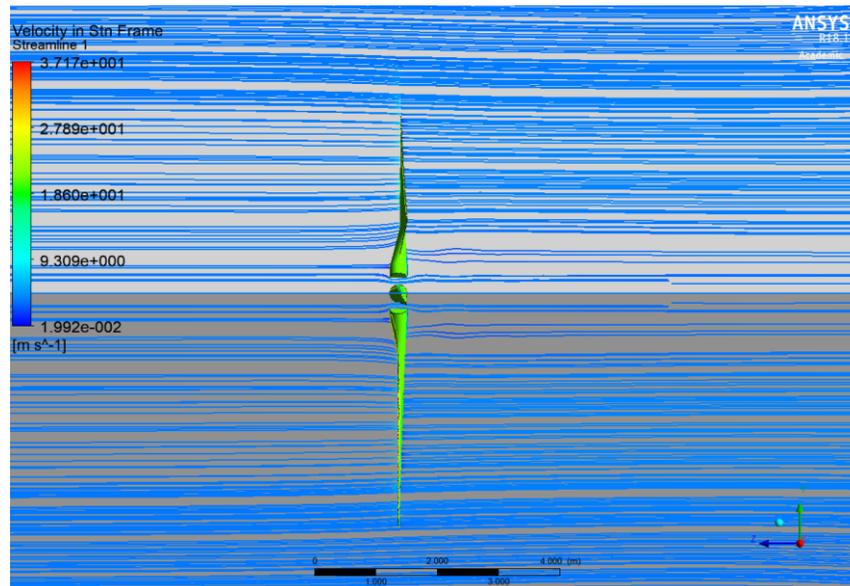
El análisis de convergencia expuesto permitió determinar el punto óptimo de independencia de malla, en donde los resultados pueden converger en valores nominales para el diseño. Asimismo, permitió escoger el tamaño del mallado más óptimo para reducir el tiempo de cálculo computacional.

En la **Figura 3.17** se puede observar que, para las constantes más importantes del análisis aerodinámico, la fuerza de empuje en coordenadas globales, arrastre en

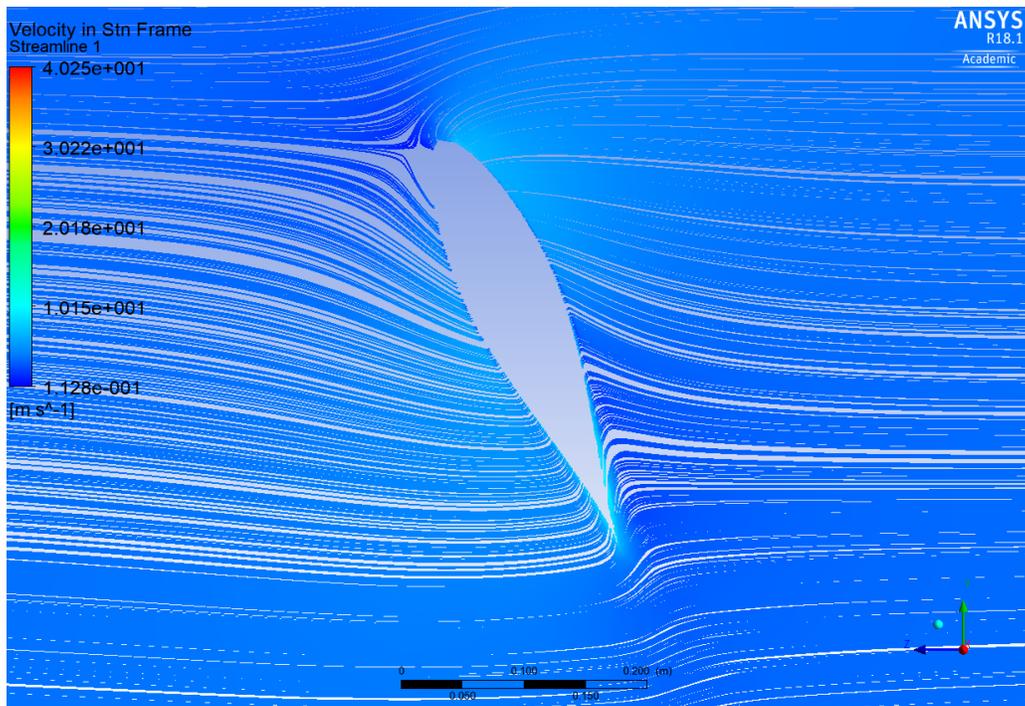
coordenadas globales y los momentos que generan, convergen en valores de elementos de 7 mm, después de ello el cálculo tiende a una pendiente casi cero. Para la evaluación de los casos de carga se utilizó el punto óptimo mencionado.

El modelo matemático k-epsilon con SST escogido permitió una convergencia alrededor de las 450 iteraciones, reduciendo el número de caras en las cuales el flujo retornaba. El modelo matemático utilizado es uno de los más adecuados debido a que permitió obtener resultados con mayor precisión cerca de las superficies tipo muro, la cual es el tipo de condición de contorno de la superficie del álabe en nuestro modelo.

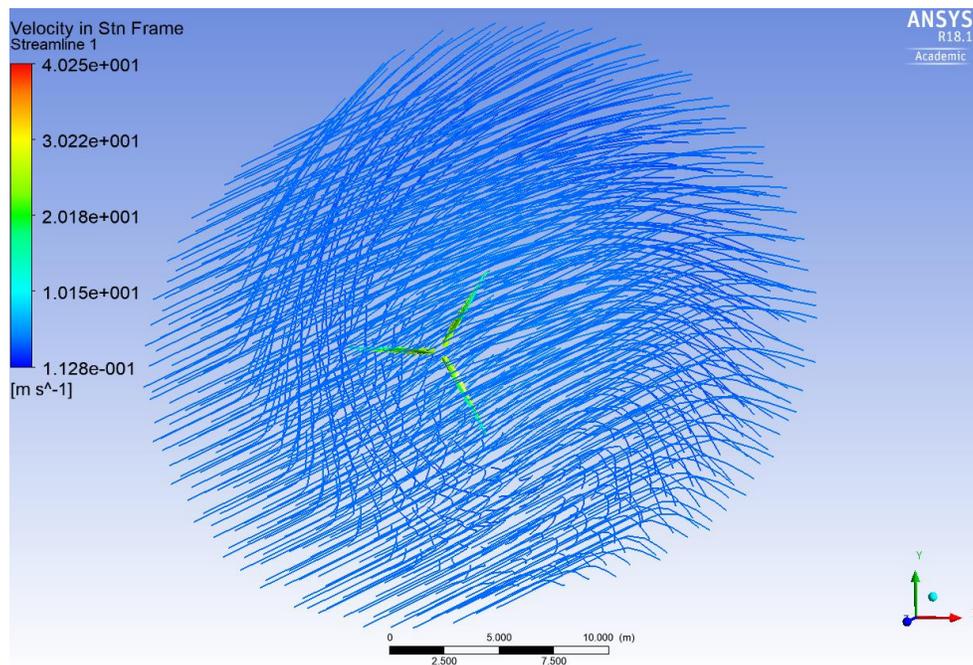
En la **Figura 3.18** se puede apreciar la distribución del flujo mediante líneas de corriente (Streamlines) en planos perpendiculares al eje del rotor. Por otro lado, a manera de verificar si existen vórtices generados por la turbulencia se analizó a detalle el perfil aerodinámico con mayor cuerda en la **Figura 3.19**, en donde se puede observar que presenta una capa de velocidades sin protuberancias. Por otro lado, en la **Figura 3.20** se puede apreciar la distribución del flujo mediante líneas de corriente (Streamlines) en todo el volumen de control; podemos decir que el fluido se ha modelado correctamente, en vista que la presencia de vórtices o indicios de alta turbulencia son escasos.



**Figura 3.18** Distribución de Flujo de Aire mediante líneas de corriente en planos.  
Fuente: Elaboración Propia.

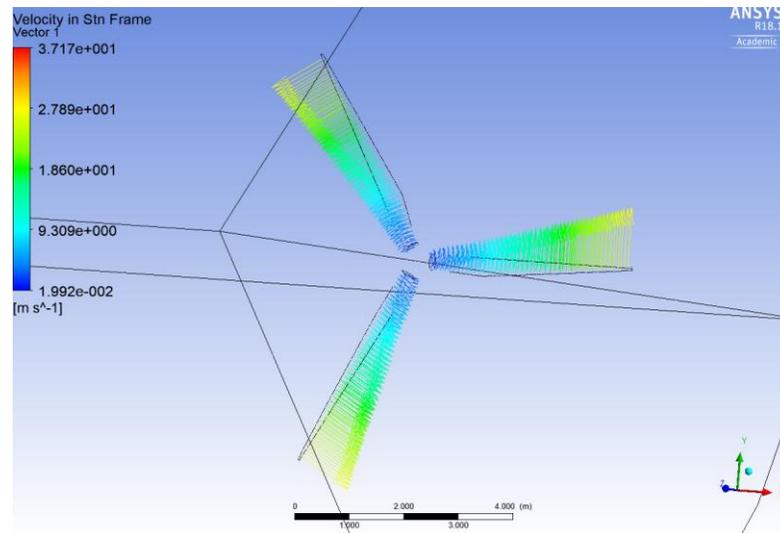


**Figura 3.19** Distribución de Flujo de Aire mediante sobre perfil aerodinámico.  
Fuente: Elaboración Propia.

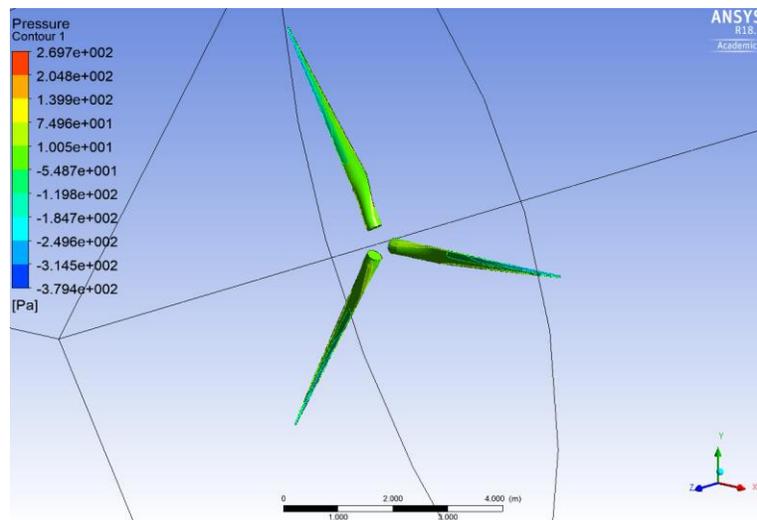


**Figura 3.20** Distribución de Flujo de Aire mediante líneas de corriente en el volumen de Control.  
Fuente: Elaboración Propia.

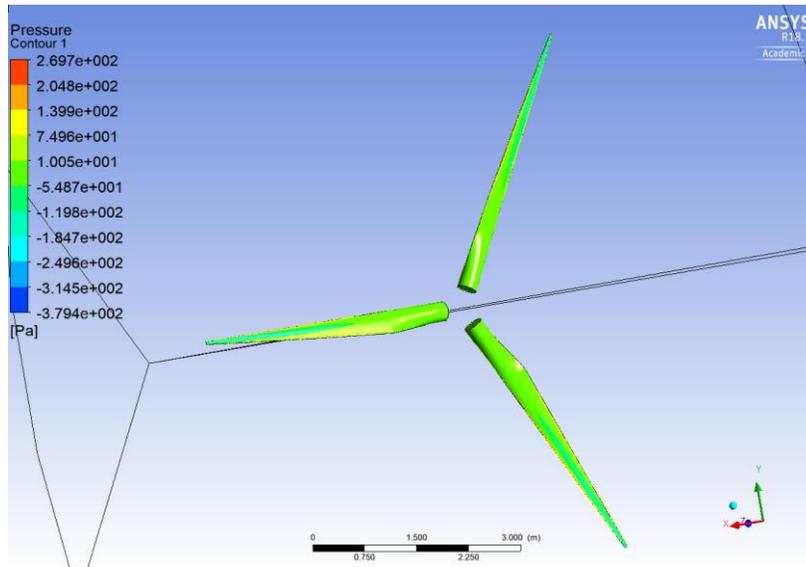
Se realizó la verificación de la velocidad tangencial en la punta del álabe, así como del torque generado en la superficie del álabe. En la **Figura 3.21**, **Figura 3.22** y **Figura 3.23** se puede observar la distribución vectorial de las velocidades tangenciales, así como la distribución de presiones en la superficie del álabe. Además, en la **Tabla 3.8** se muestra el valor del torque generado por el álabe con respecto al punto de giro.



**Figura 3.21** Distribución de Velocidades tangenciales.  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.22** Distribución de Presiones en la superficie de contacto con el fluido.  
Fuente: Elaboración Propia.



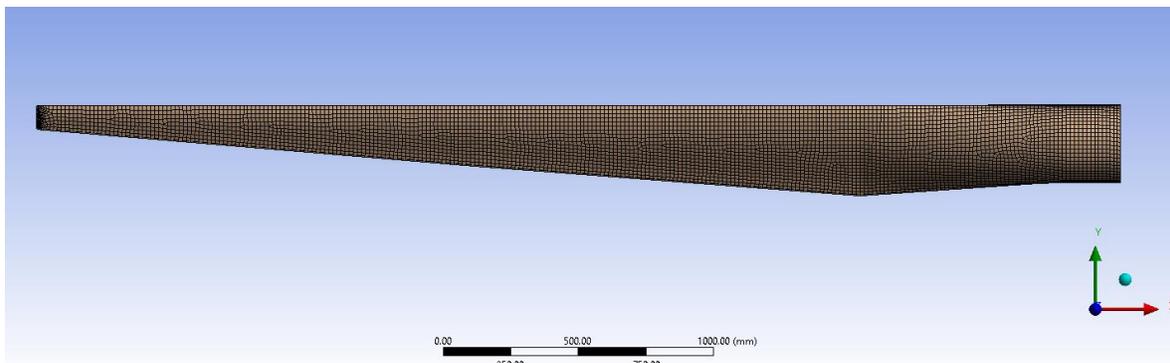
**Figura 3.23** Distribución de Presiones en la superficie trasera.  
Fuente: Elaboración Propia.

Torque Generado (N.m) -Simulación Computacional	-31.0266
---	----------

**Tabla 3.8** Valor del Torque Generado mediante Análisis de Fluidos.  
Fuente: Elaboración Propia.

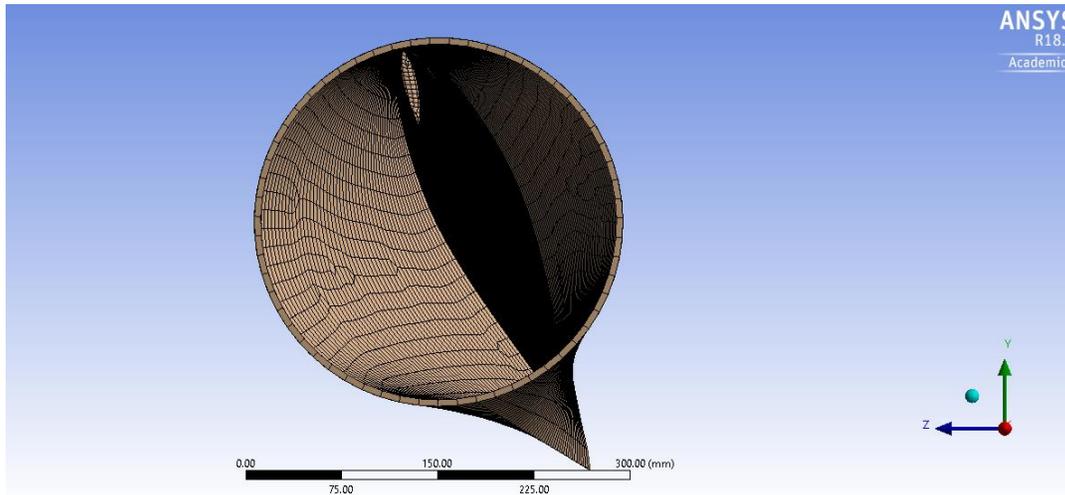
### 3.5.2 Análisis con ANSYS ACP (ANSYS composite Pre) y ANSYS ESTRUCTURAL

De manera similar al modelamiento de fluidos, se realizó un mallado sobre la superficie del álabe, el cual contaba con una malla uniforme y homogénea. Este mallado se ejecutó con la misma calidad a la utilizada para la superficie del álabe en el volumen de control del aire. Las condiciones de mallado utilizadas son las expresadas en la **Sección 2.5.2**.



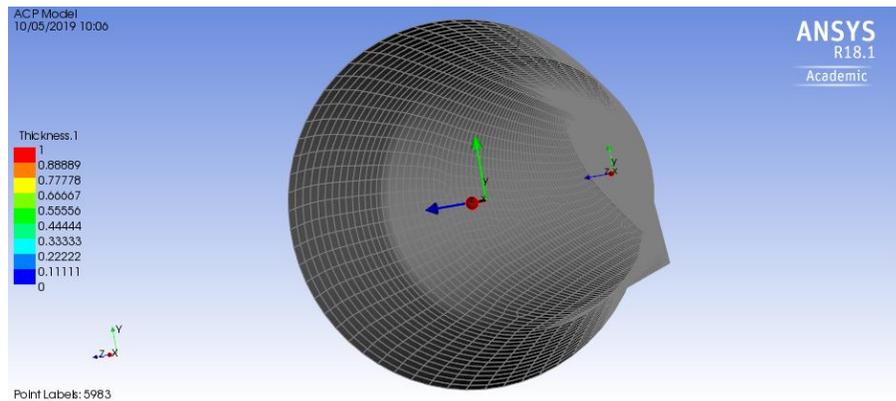
**Figura 3.24** Geometría lateral del Alabe mallado.

Fuente: Elaboración Propia.

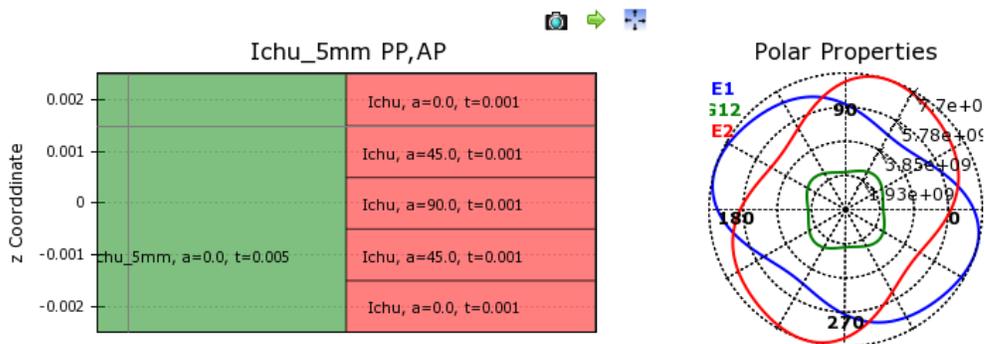


**Figura 3.25** Geometría Superficial del Ábabe mallado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 3.26**, se puede observar la distribución de ejes de coordenadas locales de superficies, de igual manera en la **Figura 3.27**, se puede observar las propiedades equivalentes del compuesto laminado obtenidas mediante el módulo ANSYS ACP.

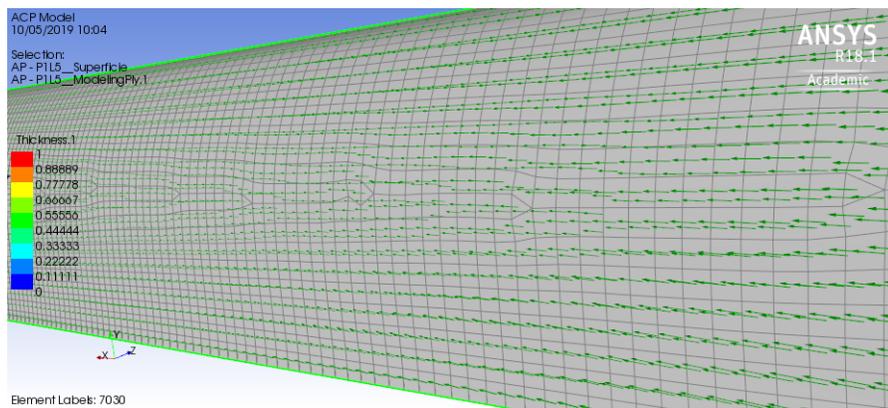


**Figura 3.26** Ejes de coordenadas locales superficiales.  
Fuente: Elaboración Propia.

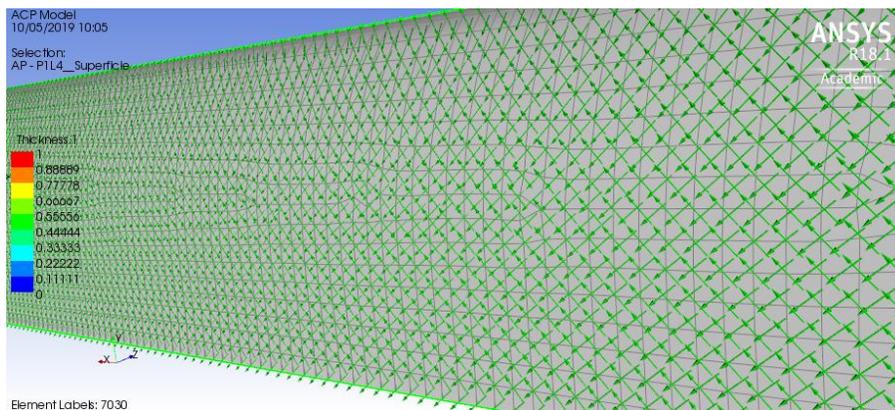


**Figura 3.27** Propiedades del compuesto laminado equivalentes de Stipa Ichu Obtusa.  
Fuente: Elaboración Propia.

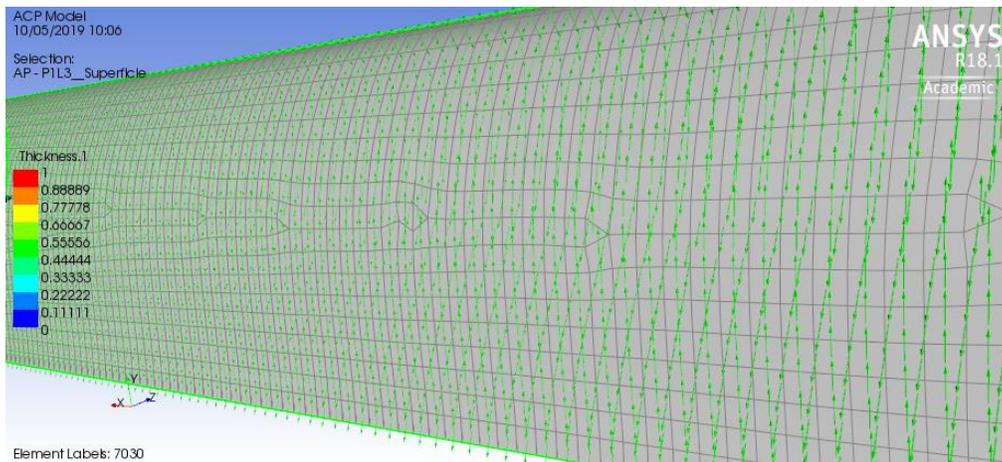
La distribución de las fibras a lo largo del álabe se detalla en la **Figura 3.28**, **Figura 3.29** y **Figura 3.30**. Se puede observar que la distribución paralela con respecto al eje longitudinal a lo largo del álabe, tanto en la raíz como en la zona aerodinámica.



**Figura 3.28** Distribución de Fibras en lámina de 0°  
Fuente: Elaboración Propia.

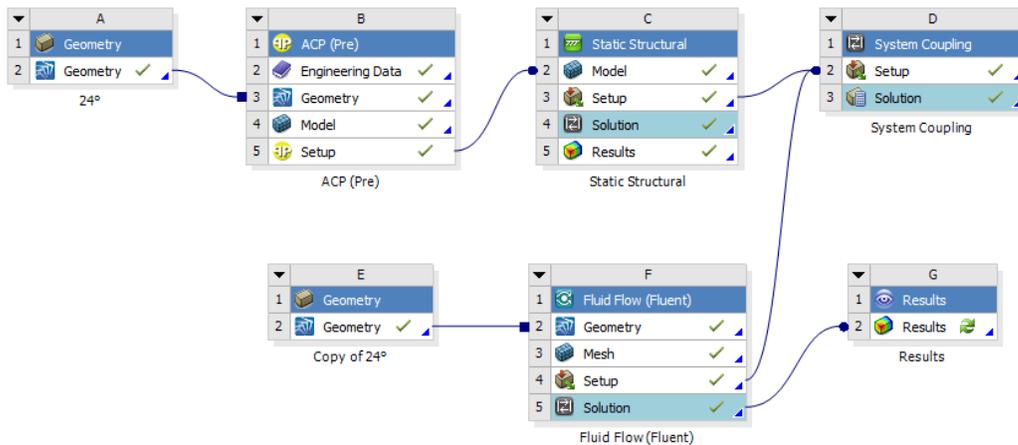


**Figura 3.29** Distribución de Fibras en lámina de 45°  
Fuente: Elaboración Propia.



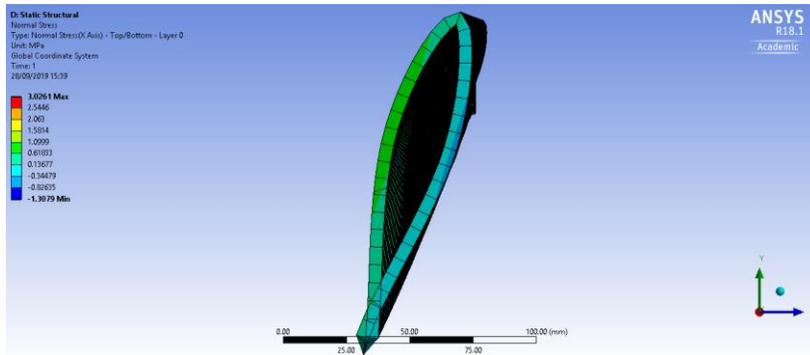
**Figura 3.30** Distribución de Fibras en lámina de 90°  
Fuente: Elaboración Propia.

Se evaluó la resistencia estructural del álabe en el último módulo de ANSYS STRUCTURAL, en donde se establecieron las condiciones como la velocidad de angular a la cual gira el rotor y el punto de giro. Para importar las cargas del módulo de FLUENT se utilizó el módulo de System Coupling, en donde las cargas de presión generadas en la superficie del álabe se importaron como carga de fuerza sobre la superficie del álabe, la representación final de los módulos se muestra en la **Figura 3.31**.



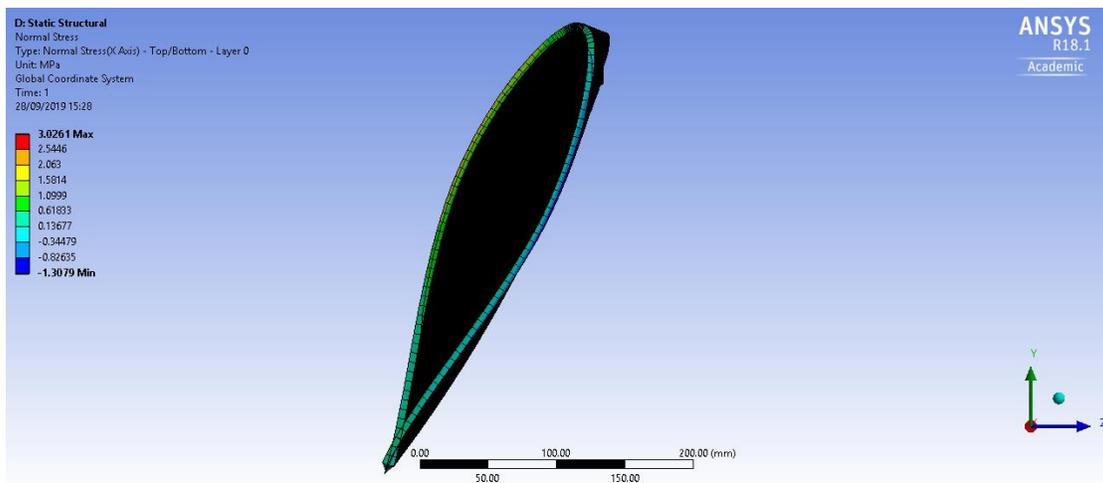
**Figura 3.31** Módulos de ANSYS utilizados  
Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenido el acoplamiento entre módulos, se obtuvieron los resultados para esfuerzos longitudinales en el eje de coordenadas X. En la **Figura 3.32**,



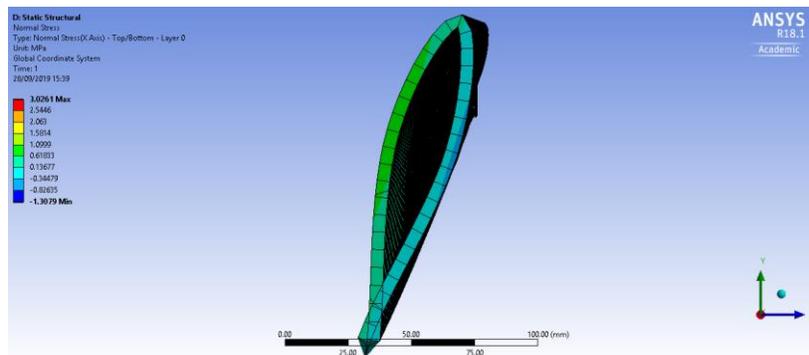
**Figura 3.33**, **Figura 3.34** y **Figura 3.35** se exponen los esfuerzos longitudinales obtenidos en el perfil aerodinámico número 3, el perfil aerodinámico número 16, así como las superficies inferior y superior del álabe. La distribución de los esfuerzos longitudinales en todos los perfiles aerodinámicos, así como en la raíz circular del álabe se exponen en el

## Anexo 5.

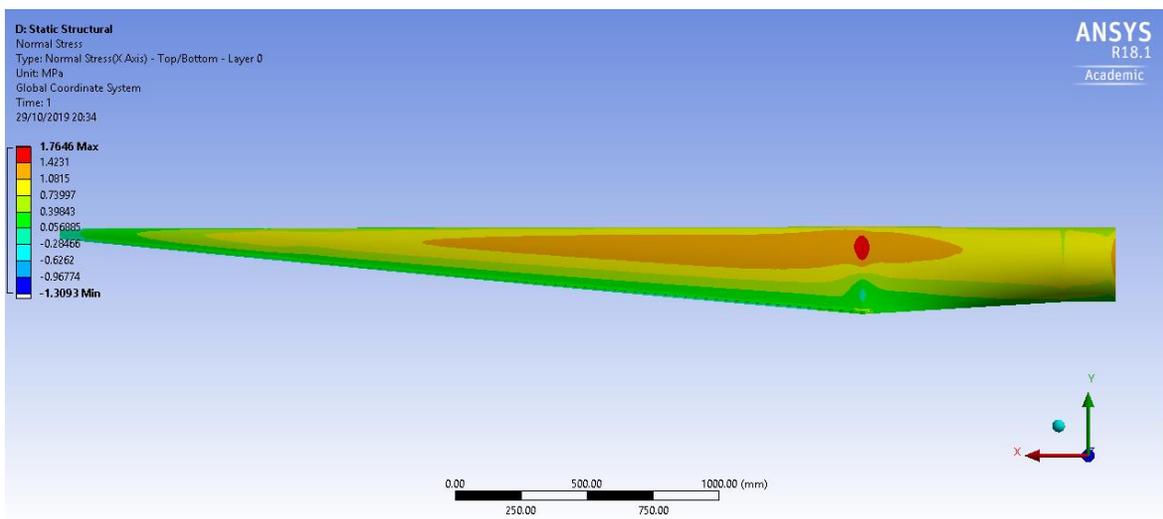


**Figura 3.32** Esfuerzos Longitudinales en la sección del álabe (Perfil aerodinámico N°3).

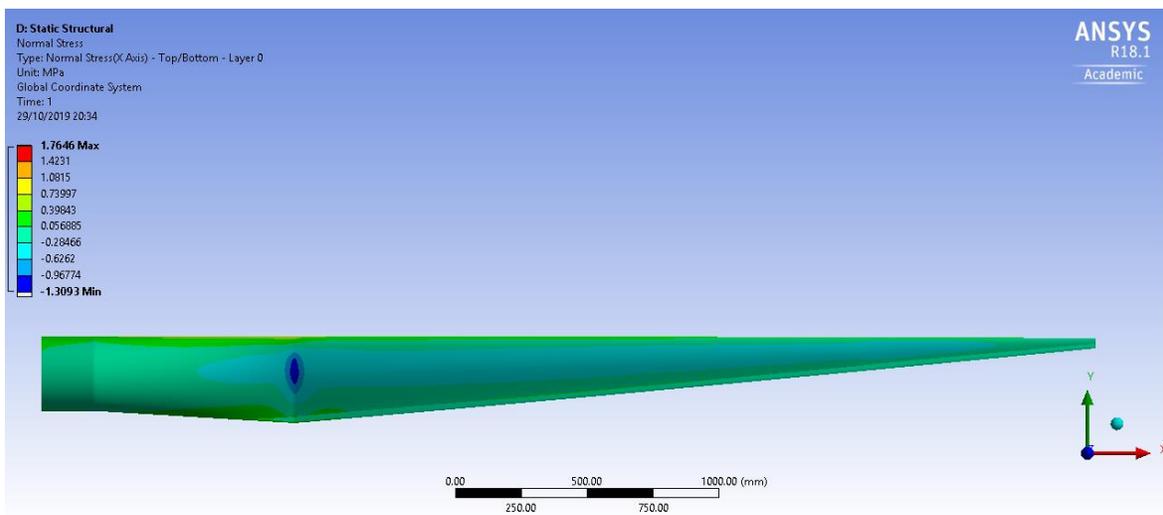
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.33** Esfuerzos Longitudinales en la sección del álabo (Perfil aerodinámico N°16).  
 Fuente: Elaboración Propia.

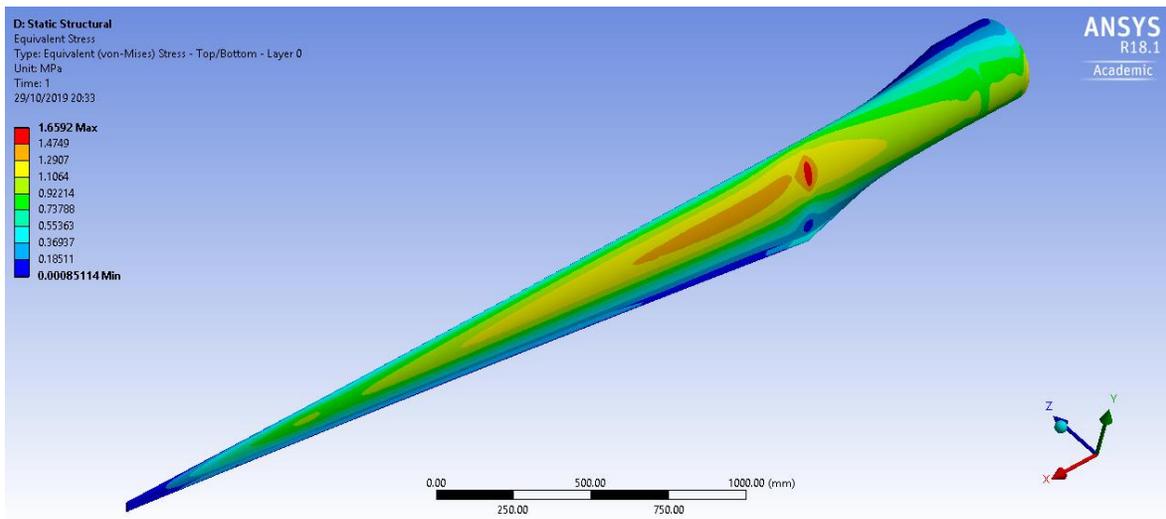


**Figura 3.34** Esfuerzos Longitudinales en la superficie Superior del Álabo.  
 Fuente: Elaboración Propia.



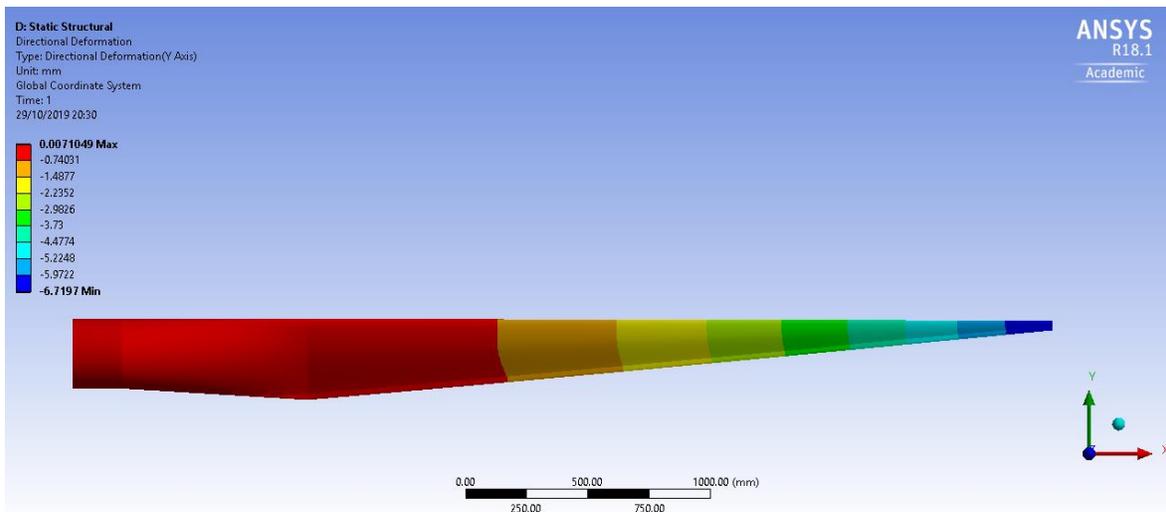
**Figura 3.35** Esfuerzos Longitudinales en la superficie inferior del Álabo.  
 Fuente: Elaboración Propia.

Se obtuvo la distribución de los esfuerzos Equivalentes de VonMises a lo largo del álabe en la **Figura 3.36** para verificar la diferencia con respecto a las cargas longitudinales. Se puede apreciar que no existe una gran diferencia entre los esfuerzos longitudinales y los esfuerzos equivalentes de VonMises, debido a ello el tomar como referencia los esfuerzos longitudinales nos permite tener un criterio de diseño más preciso, al ser la carga que más aporta a los esfuerzos totales a los cuales se somete el álabe.

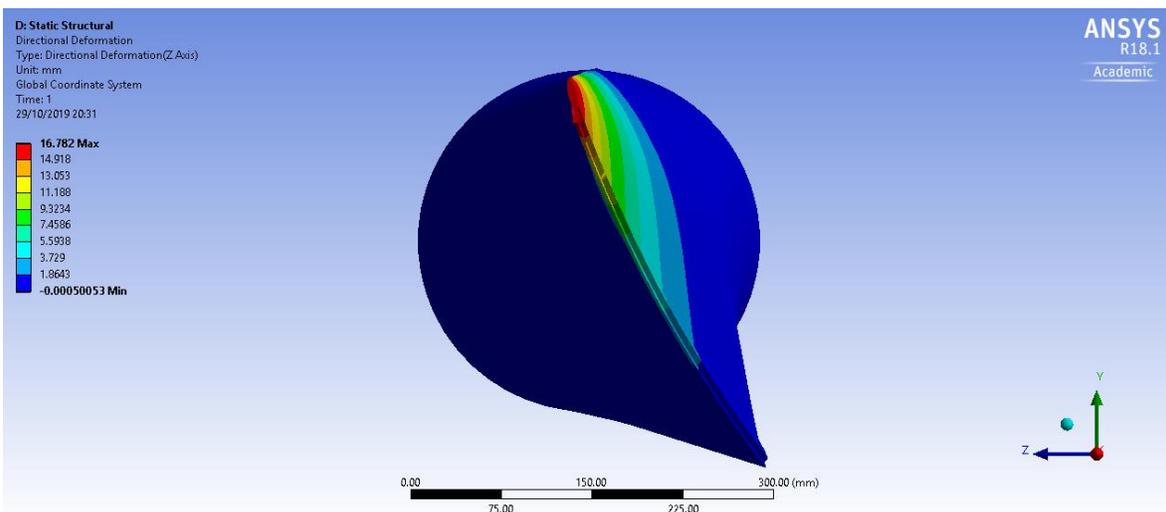


**Figura 3.36** Esfuerzos Equivalentes de VonMises a lo largo del Álabe.  
Fuente: Elaboración Propia.

Complementando los resultados mostrados anteriormente, en la **Figura 3.37** y en la **Figura 3.38** se muestra la deformación con respecto a los ejes de coordenadas globales Z e Y, en donde se aprecia una deflexión máxima de 6.719 mm en el eje Y y una deflexión máxima 16.782 mm en el eje Z.



**Figura 3.37** Deflexión con respecto al eje Y  
 Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.38** Deflexión con respecto al eje Z  
 Fuente: Elaboración Propia.

### 3.5.3 Validación de Resultados de Calculo Analíticos con Simulación Computacional

Al momento de realizar el contraste con la simulación computacional, existía una gran diferencia porcentual con relación a las cargas de empuje y arrastre en coordenadas globales, producto de la distribución de las cargas de empuje y arrastre en coordenadas locales del alabe. A manera de corrección se estudió las distintas causas de esta divergencia en los valores obtenidos, en el estudio realizado para el cálculo de las cargas en el punto de fijación del alabe se establecen las distintas correcciones y consideraciones que se deben

tener en cuenta al realizar el cálculo, por lo cual teoría de Blade Element Momentum, es una buena aproximación para determinar el coeficiente de potencia y referencia para la estimación de cargas. Sin embargo, se deben aplicar ciertas correcciones. [31] Para fines de este estudio se utilizó la teoría de BEM para establecer el grado de los esfuerzos. Así, como el patrón y distribución de los mismos validando los resultados computacionales, reduciendo la incertidumbre en los valores obtenidos en las cargas que genera el torque en el rotor y el empuje del alabe en coordenadas globales. Los valores obtenidos para el empuje y arrastre en coordenadas globales se encuentran en la **Tabla 3.9**.

Variable	Método Analítico	Simulación Computacional	Diferencia Porcentual
Carga de Empuje en coordenadas Globales (N)	-10.0661	-11.0014	8.50
Carga de Arrastre en coordenadas Globales (N)	18.8041	28.0656	32.99

**Tabla 3.9** Validación de Cargas de Empuje y Arraste en coordenadas globales.  
Fuente: Elaboración Propia.

En adición para la validación de los resultados obtenidos mediante el cálculo BEM, en contraste con la simulación computacional se compararon variables importantes: El torque generado por el álabe y la velocidad tangencial en el álabe. Como podemos observar en la **Tabla 3.10**, el torque generado por el álabe y la velocidad tangencial presentan una diferencia porcentual con valores de 3.631% y 6.9%, el cual es un indicador de que las cargas modeladas con el método analítico guardan correlación con las obtenidas mediante la simulación computacional, manteniendo la diferencia porcentual obtenidas en las cargas y posteriormente repercutiendo en los esfuerzos.

Variable	Simulación Computacional	Método Analítico	Diferencia Porcentual
Torque Generado por el Álabe (N.m)	-31.0266	-29.9	3.631
Velocidad Tangencial (m/s)	30.10	28	6.9

**Tabla 3.10** Validación de Cargas Aerodinámicas  
Fuente: Elaboración Propia.

Como complemento para la validación estructural se compararon los valores de fuerza centrípeta ocasionados por la rotación del álabe, obteniendo los valores expuestos en

la **Tabla 3.11**. De esta manera se demuestra que los valores obtenidos a través de la simulación computacional tienen una aproximación a los valores calculados analíticamente.

Variable	Simulación Computacional	Método Analítico	Diferencia Porcentual
Fuerza Centrípeta (N)	1131.4	976.8298	15.82

**Tabla 3.11** Validación de Carga Centrípeta.  
Fuente: Elaboración Propia.

Una vez validadas las cargas aerodinámicas y la carga centrípeta, se procedió a realizar la comparación de los esfuerzos longitudinales obtenidos mediante el método de viga y los esfuerzos obtenidos mediante simulación computacional. En la **Tabla 3.12** se detalla la variación porcentual de los esfuerzos obtenidos en los 20 perfiles aerodinámicos.

Se puede apreciar que en los puntos cercanos al cambio de sección existe una mayor variación de los esfuerzos longitudinales, en comparación con los puntos más lejanos de la raíz circular. En las figuras previamente mostradas no se consideró el esfuerzo generado por la carga centrípeta, por lo que en la segunda parte de la **Tabla 3.12** se exponen los valores de esfuerzos tomando en cuenta la aceleración centrípeta.

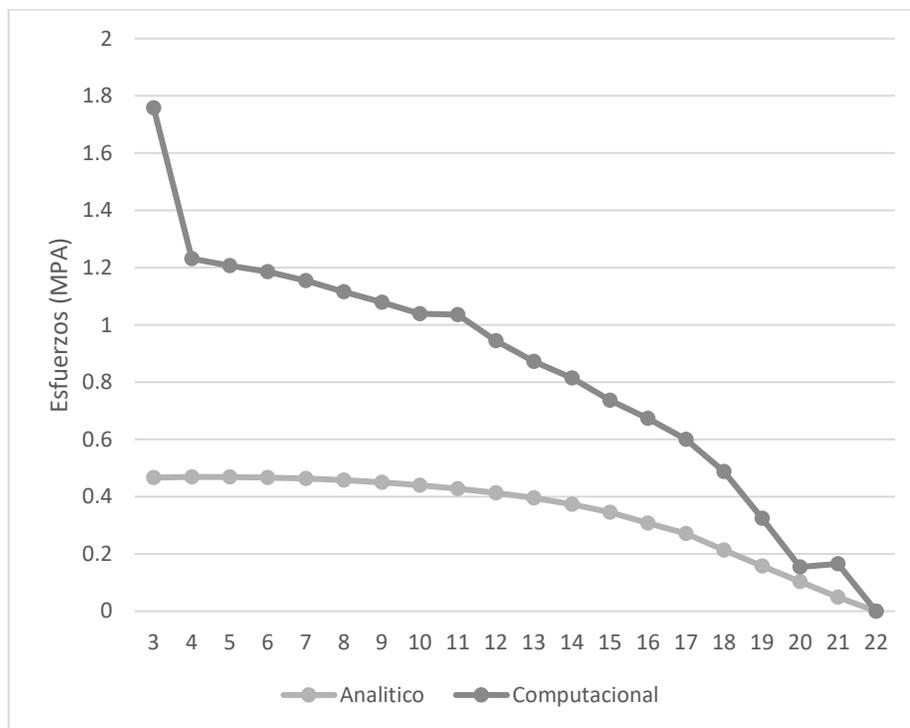
Perfil Aerodinámico	Esfuerzos Longitudinales Máximos (MPa) Con Carga Centrípeta		Diferencia Porcentual	Esfuerzos Longitudinales Mínimos (MPa) Con Carga Centrípeta		Diferencia Porcentual
	Simulación Computacional	Método Analítico		Simulación Computacional	Método Analítico	
4	1.2313	0.4682	61.98%	-0.35127	0.042537	112.11%
5	1.2069	0.46846	61.18%	-0.42	0.035518	108.46%
6	1.1859	0.46699	60.62%	-0.45042	0.028286	106.28%
7	1.1548	0.46348	59.86%	-0.47122	0.020901	104.44%
8	1.1155	0.45791	58.95%	-0.4943	0.013359	102.70%
9	1.0794	0.45024	58.29%	-0.51438	0.005684	101.11%
10	1.0385	0.44036	57.60%	-0.51839	-0.002047	99.61%
11	1.0357	0.42803	58.67%	-0.45256	-0.009656	97.87%
12	0.94464	0.41288	56.29%	-0.50458	-0.016839	96.66%
13	0.872	0.39484	54.72%	-0.27105	-0.023574	91.30%
14	0.81418	0.37306	54.18%	-0.40181	-0.029196	92.73%
15	0.73703	0.34502	53.19%	-0.45404	-0.031628	93.03%
16	0.6738	0.30716	54.41%	-0.43324	-0.027758	93.59%
17	0.5998	0.27036	54.92%	-0.51327	-0.017149	96.66%
18	0.48768	0.21277	56.37%	-0.30322	-0.00225	99.26%
19	0.32422	0.15789	51.30%	-0.3609	0.008709	102.41%
20	0.15378	0.1033	32.83%	-0.049791	0.016193	132.52%

21	0.16478	0.04857	70.52%	-0.052989	0.017678	133.36%
22	0	0	0.00%	0	0	0.00%

**Tabla 3.12** Validación de Esfuerzos Longitudinales.

Fuente: Elaboración Propia.

La distribución de esfuerzos presenta una diferencia porcentual relativamente alta en los puntos donde la longitud de cuerda es alta, además se puede considerar como una buena aproximación debido a que existe una concentración de esfuerzos producidos por el cambio de sección que presenta el álabe desde un perfil aerodinámico a una sección circular. Los cuales son uno de los motivos por los cuales se realizó el análisis mediante simulación computacional, identificando los puntos de concentración de esfuerzos y la interacción entre las secciones de perfiles aerodinámicos, las cuales el método BEM, se encuentra limitado. La comparación entre los valores de esfuerzos longitudinales analíticos y computacionales se presentan en la **Figura 3.39**.



**Figura 3.39** Comparativa de esfuerzos longitudinales en análisis computacional y analítico.

Fuente: Elaboración Propia.

Por último, en la **Tabla 3.13** se exponen las variaciones porcentuales respecto a las deflexiones producidas en el álabe, en ambos ejes de giro.

Variable	Simulación Computacional	Método Analítico	Diferencia Porcentual
Deflexión en el eje y	-6.78	1.8	126.5486
Deflexión en el eje z	16.891	2.4	85.79125

**Tabla 3.13** Validación de Deflexiones en el álabe.  
Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, la diferencia porcentual en el método BEM, repercutió en el cálculo de los esfuerzos longitudinales, por lo cual los esfuerzos obtenidos presentaban una variación porcentual del mismo grado de 60% en promedio. Pese a ello, el método de viga sirvió para estimar el diseño final en base a los límites establecidos por la normativa IEC 61400-2, reduciendo el cálculo computacional, dando la posibilidad de determinar el modelo más óptimo.

### 3.5.4 Validación de Diseño Estructural con Normativas Internacionales

Habiendo validado que las condiciones y parámetros establecidos en la simulación computacional convergen en valores obtenidos mediante el cálculo analítico, se consideraron como aceptables los resultados obtenidos mediante la metodología planteada.

Luego se determinaron los valores de esfuerzo límite en los ejes coordenadas correspondientes, calculando los esfuerzos límite de diseño, corrigiéndolos con los factores de material y de carga planteados en la **Sección 1.6.2.1**. En la siguiente tabla se presentan los valores de esfuerzos límites corregidos con los factores de seguridad de la normativa.

Variable	Valores Nominales	Valores corregidos con factor de seguridad
Esfuerzo Límite X	118 MPa	79 MPa
Esfuerzo Límite Y	50 MPa	33.7 MPa
Esfuerzo Límite Z	50 MPa	33.7 MPa

**Tabla 3.14** Esfuerzos Límite de Diseño  
Fuente: Elaboración Propia.

A fin de cumplir con las normativas internacionales, el diseño obtenido se sometió a las condiciones de carga expuestas en la **Sección 1.6.2** para la situación de Diseño de Producción de Potencia, por lo cual se volvieron a realizar las simulaciones computacionales con la metodología validada. Estos escenarios, se plantearon con el fin de determinar las posibles situaciones críticas de carga debido al incremento de la velocidad

del viento en momentos determinados y a lo largo de su vida útil. Las velocidades y ángulos de incidencia del flujo de viento se presentan en la **Tabla 3.2**.

A diferencia de los 4 últimos casos de condiciones de carga, el primer método se caracteriza por establecer un límite sobre el cual la densidad espectral de potencia (PSD) del viento de la simulación debe cumplir el límite establecido por la normativa IEC61400-2. Esta validación se realizaría en la simulación computacional, mediante la inserción de puntos de medición en la zona de succión de los perfiles aerodinámicos, permitiendo obtener los valores de PSD de la velocidad, en la dirección del viento del punto de medición a través de la Transformada Rápida de Fourier. Sin embargo, debido a que el modelo se realizó bajo condiciones de flujo estacionario utilizando el modelo matemático k-w es del tipo RANS (Averaged Reynold Navier Stokes), no se pudo obtener el espectro de densidad de Potencia. Por limitaciones de cálculo se omitirá esta condición, de igual manera se verifica que la presencia de turbulencia no afecta al desempeño de la turbina bajo condiciones de operación normal.

A continuación, en la **Tabla 3.15** se detallan los esfuerzos obtenidos mediante la simulación para cada tipo de carga, así como las deflexiones en los ejes principales. Para la validación de este método se tomó en consideración los esfuerzos máximos en los ejes de coordenadas principales locales de las láminas, tomando como valor crítico el esfuerzo de tracción y compresión en sus direcciones X, Y e Z, obteniendo el factor de seguridad de diseño del álabe bajo el criterio de esfuerzos máximos establecidos en la **Sección 1.5.3.1**.

Casos de Carga	Simulación Computacional Esfuerzos (MPa)								
	Esfuerzo de Tracción Limite X	Esfuerzo de Tracción Limite Y	Esfuerzo de Tracción Limite X	Esfuerzo de Compresión Limite X	Esfuerzo de Compresión Limite Y	Esfuerzo de Compresión Limite Z	Esfuerzo Equivalente de Von Misses	Deflexión en el eje Y (mm)	Deflexión en el eje Z (mm)
Método de Ráfaga Coherente	37.51	7.9144	2.5811	-9.5368	-5.0644	-2.1913	35.177	72.128	142.36
Método de Ráfaga coherente extrema con cambio de dirección.	102.15	21.368	19.637	-48.781	-23.601	-20.203	103.03	139.13	242.51

Casos de Carga	Simulación Computacional Esfuerzos (MPa)								
	Esfuerzo de Tracción Limite X	Esfuerzo de Tracción Limite Y	Esfuerzo de Tracción Limite X	Esfuerzo de Compresión Limite X	Esfuerzo de Compresión Limite Y	Esfuerzo de Compresión Limite Z	Esfuerzo Equivalente de Von Misses	Deflexión en el eje Y (mm)	Deflexión en el eje Z (mm)
Ráfaga de Operación Extrema	6.715	1.7119	1.8172	-1.21	-1.5241	-1.7125	6.1982	16.541	36.409
Cambio de Dirección Extrema.	1.99	0.89951	0.2302	-1.9299	-0.59623	0.2413	1.898	7.9574	19.946

**Tabla 3.15** Valores de Esfuerzos y Deflexión para casos de carga.  
Fuente: Elaboración Propia.

En base a los resultados expuestos en la **Tabla 3.15** se puede apreciar que, en los casos de carga de método de ráfaga coherente, ráfaga de operación extrema, cambio de dirección extrema, se presentan valores de carga por debajo de los límites del material; de igual manera la deflexión generada en los ejes principales no supera los límites establecidos. Sin embargo, bajo las condiciones del caso de carga de ráfaga coherente extrema con cambio de dirección, los valores de esfuerzos de compresión y tracción en los ejes principales se elevan a valores superiores a los límites del material. Asimismo, los valores de deflexión superan el 6 % de la longitud total del álabe, lo cual no permite que se encuentre dentro de los parámetros establecidos por la normativa.

Como primera modificación a manera de incrementar el área de la sección transversal y consecuentemente su inercia, se propuso incrementar el espesor del álabe a un valor de 10 mm. Así se pudo incrementar la inercia y reducir los esfuerzos longitudinales y a su vez la deflexión generada en el álabe. Los valores obtenidos se exponen en la **Tabla 3.16**.

Casos de Carga	Simulación Computacional Esfuerzos (MPa)								
	Esfuerzo de Tracción Limite X	Esfuerzo de Tracción Limite Y	Esfuerzo de Tracción Limite Z	Esfuerzo de Compresión Limite X	Esfuerzo de Compresión Limite Y	Esfuerzo de Compresión Limite Z	Esfuerzo Equivalente de Von Misses	Deflexión en el eje Y (mm)	Deflexión en el eje Z (mm)
Método de Ráfaga coherente extrema con cambio de dirección.	80.173	4.4517	4.6191	-23.395	-16.064	-13.944	82.853	-62.942	108.53

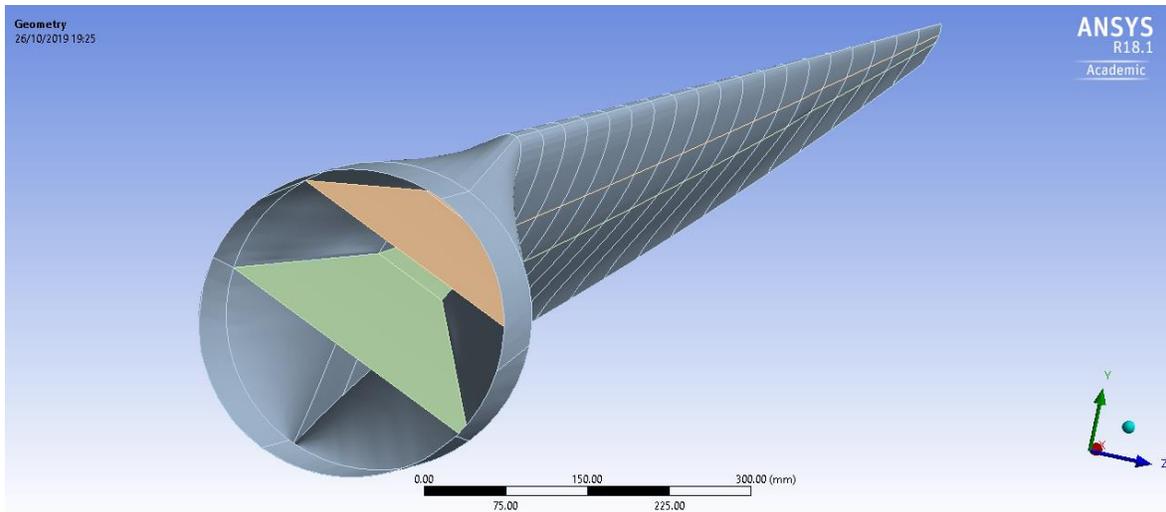
**Tabla 3.16** Valores de Esfuerzos y Deflexión para Álabes con 10 mm de espesor.  
Fuente: Elaboración Propia.

En vista que los valores de esfuerzos de tracción longitudinales se encuentran dentro de los límites del material, los valores de esfuerzos de compresión superan los valores establecidos por el material, los valores de deflexión presentan una deformación del 3 % aproximadamente del total del largo del álabes, resulta aceptable. Sin embargo, se encuentra fuera del límite de esfuerzo admisible de tracción por lo cual no cumple este diseño para las condiciones de diseño establecidas.

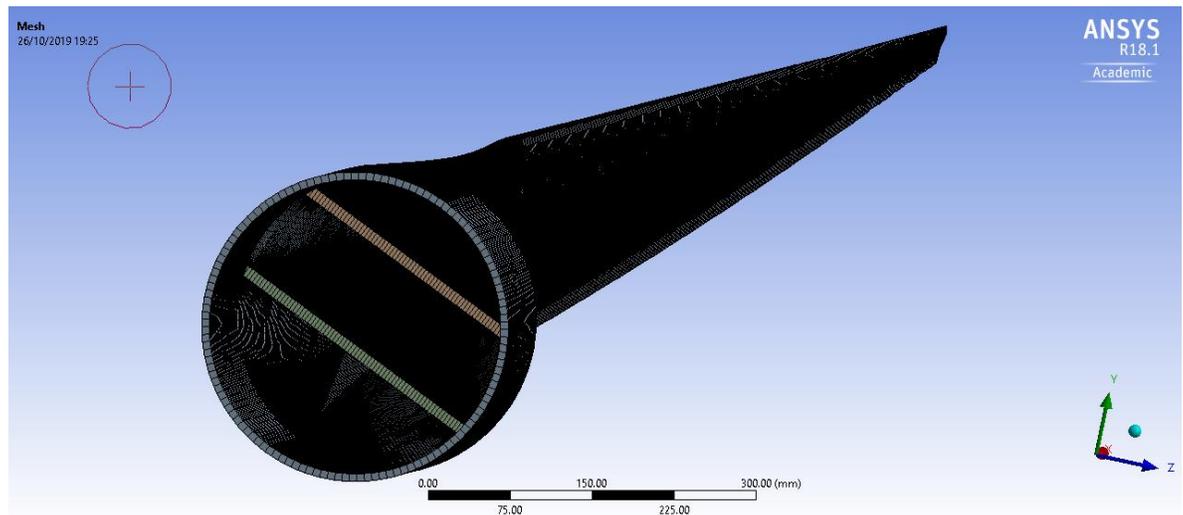
A manera de optimizar el diseño realizado y cumplir con la normativa internacional, se planteó implementar en el álabes unas alas de material compuesto. Esta modificación se encuentra dentro de las configuraciones existentes en el diseño de álabes como se expone en la **Figura 1.2**, permitiendo incrementar su inercia. De esta manera se incrementó la rigidez del material reduciendo la deflexión en ambos ejes principales.

La configuración realizada en el presente trabajo es la expuesta en la **Figura 3.40**, la cual consiste en dos alas con dimensiones 256 mm de alto y una separación entre ellas de 120 mm en su valor máximo en la raíz del álabes, partiendo de la raíz secundaria del álabes, hasta la punta del álabes. La configuración inicial para la implementación de las alas se mantuvo el espesor de la cáscara externa del álabes en 7 mm y el ala con un espesor de 10 mm, ambos con *Stipa Obtusa* como material base para su construcción. Se realizó el

mallado conforme a la **Figura 3.41**, donde se puede apreciar el espesor correspondiente de cada componente independiente.



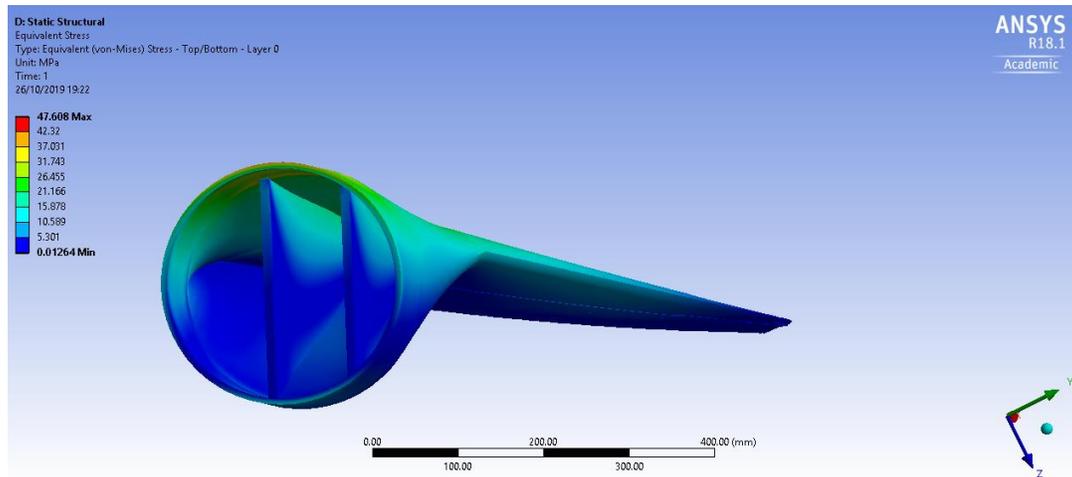
**Figura 3.40** Ábabe de Turbina eólica con Alma Tubular.  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.41** Mallado de Ábabe con Alma tubular.  
Fuente: Elaboración Propia.

En vista que en los casos de carga expuestos en la **Tabla 3.15**, el caso que predomina es el de método de ráfaga coherente con cambio de dirección, se procedió a realizar los análisis bajo estas condiciones, validando de esta manera el cumplimiento con la normativa. Durante el análisis realizado a la nueva configuración planteada, se redujeron los esfuerzos a valores por debajo de los límites del material. Asimismo, la deflexión

generada en los ejes principales se redujo a menos del 1 % del total del álabe aproximadamente, siendo muy aceptable dentro de los parámetros establecidos. La distribución de esfuerzos de Von Mises para la configuración presentada se exponen en la **Figura 3.42**, donde se aprecia un valor de esfuerzo reducido en mayor medida en comparación con el caso previo sin aplicación de almas.



**Figura 3.42** Distribución de Esfuerzos de Von Mises en álabe de turbina con alma de 10 mm.  
Fuente: Elaboración Propia.

Sin embargo, los valores de esfuerzos cortantes se encuentran cercanos a los esfuerzos límites, convirtiendo esto en una limitante para esta última configuración planteada. A fin de obtener la configuración más óptima se realizaron dos configuraciones adicionales, detallando los resultados obtenidos en la **Tabla 3.17**.

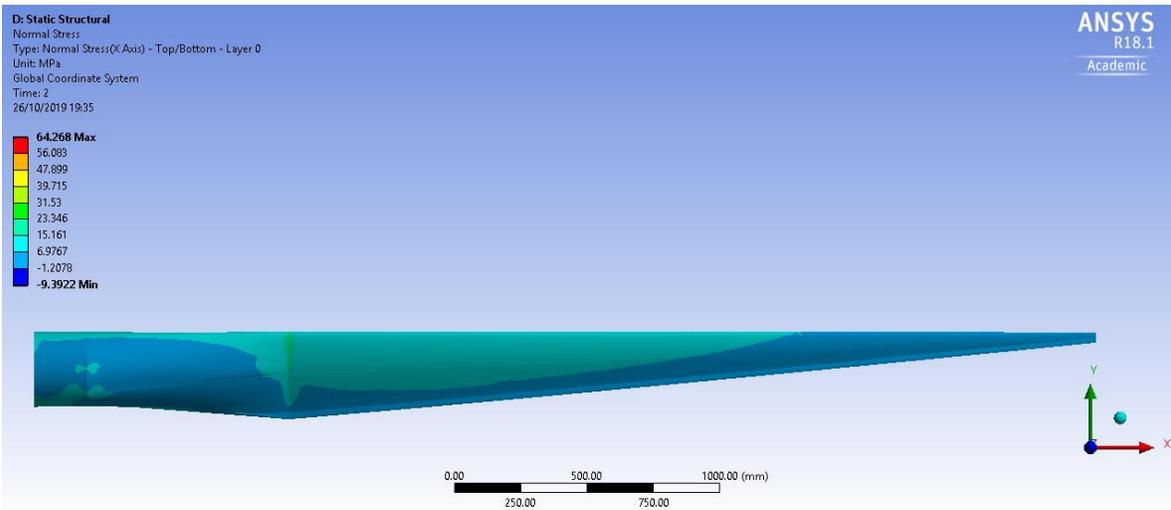
Método de Ráfaga coherente extrema con cambio de dirección	Simulación Computacional Esfuerzos (MPa)		
	Incrementando espesor del Álabe 7 mm y Alma con espesor de 10 mm	Incrementando espesor del Álabe 5 mm y Alma con espesor de 16 mm	Incrementando espesor del Álabe 7 mm y Alma con espesor de 16 mm
Descripción de Configuración			
Esfuerzo de Tracción Limite X	45.358	64.268	56.924
Esfuerzo de Tracción Limite Y	5.6332	12.604	6.0324
Esfuerzo de Tracción Limite X	21.977	16.894	24.224
Esfuerzo de Compresión Limite X	-14.371	-9.3922	-13.54
Esfuerzo de Compresión Limite Y	-8.5229	-8.683	-7.6232
Esfuerzo de Compresión Limite Z	-13.627	-12.872	-18.262
Esfuerzo de Von Mises	47.608	64.066	59.095

Método de Ráfaga coherente extrema con cambio de dirección	Simulación Computacional Esfuerzos (MPa)		
	Incrementando espesor del Álabes 7 mm y Alma con espesor de 10 mm	Incrementando espesor del Álabes 5 mm y Alma con espesor de 16 mm	Incrementando espesor del Álabes 7 mm y Alma con espesor de 16 mm
Descripción de Configuración			
Esfuerzo de Cortante Limite XY	-17.8274	5.2981	-8.0389
Esfuerzo de Cortante Limite YZ	-10.194	-7.9133	-11.283
Esfuerzo de Cortante Limite XZ	16.034	12.58	16.028
Deflexión en el eje Y (mm)	-69.035	2.6948	61.302
Deflexión en el eje Z (mm)	116.67	25.03	99.173

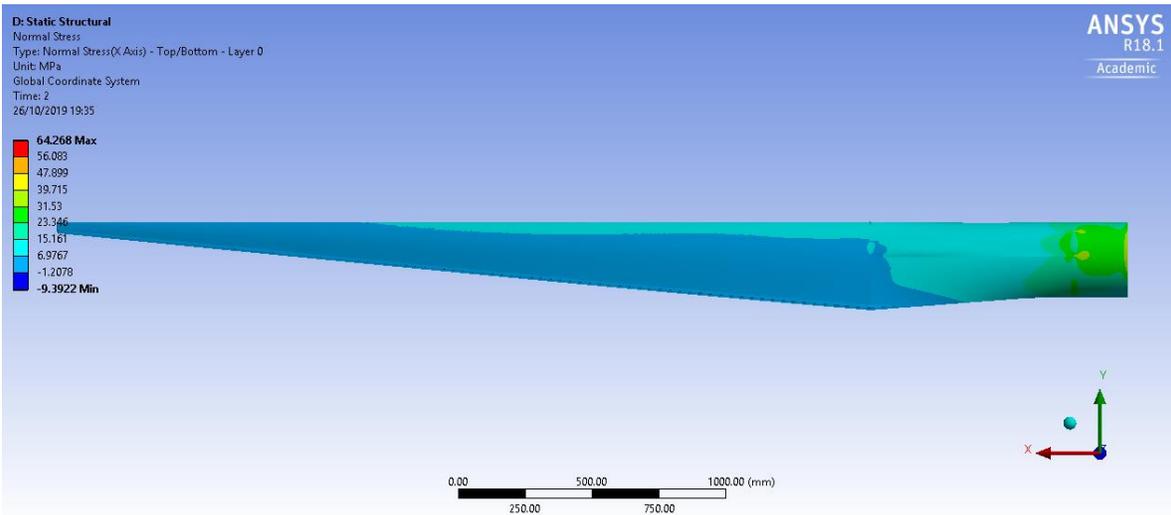
**Tabla 3.17** Distribución de Esfuerzos y Deflexiones en configuraciones en Álabes con Alma integrada.  
Fuente: Elaboración Propia.

Dentro de las configuraciones expuestas se puede observar que el diseño que presenta menores valor de deflexión estando dentro del límite establecido de 90 mm es el de una cáscara superficial de 5 mm y un alma con espesor de 16 mm. En la **Figura 3.43** y **Figura 3.44** se puede apreciar la distribución de esfuerzos longitudinales en las superficies inferior y superior del álabes, notando que se han reducido en gran medida la concentración de esfuerzos que se generaba sin la implementación del alma. Asimismo, los esfuerzos se han reducido a valores dentro de los límites establecidos del material; de igual manera la deflexión expuesta en la **Figura 3.45** y la **Figura 3.46** se encuentra a 0.5% de la longitud total del álabes, lo cual es más que deseable.

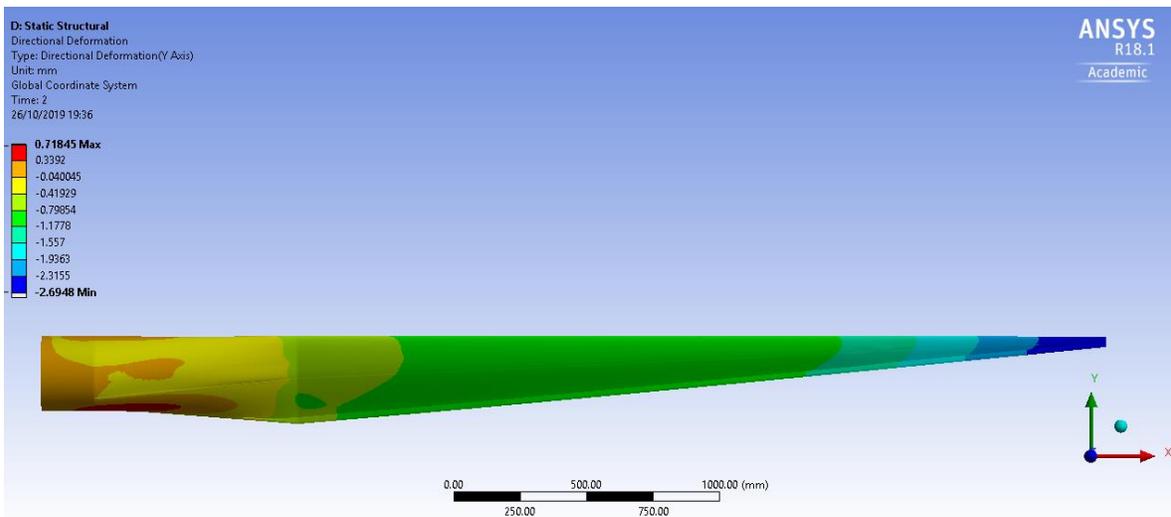
Por último, se realizó la comparación de los límites establecidos con los criterios de falla de máximos esfuerzos y máximas deformaciones establecidos previamente, estableciendo que se encuentran dentro de los límites del material, cumpliendo con la normativa internacional y lo estipulado en el criterio de falla.



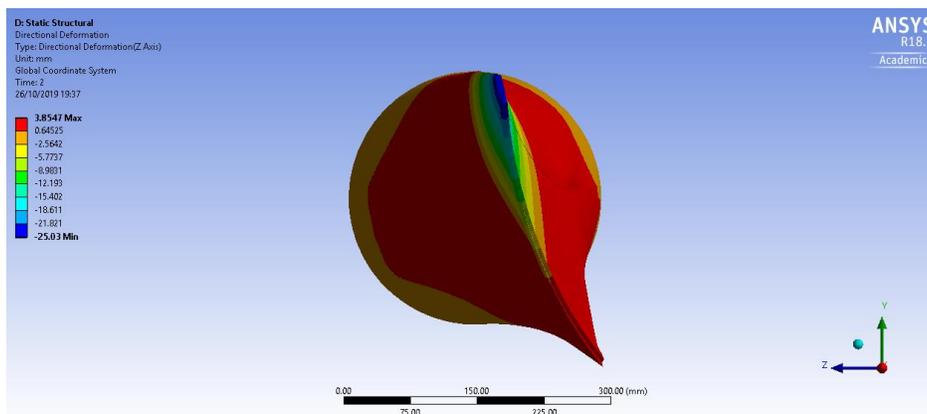
**Figura 3.43** Esfuerzos Longitudinales en la superficie superior del álabe.  
 Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.44** Esfuerzos Longitudinales en la superficie inferior del álabe.  
 Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.45** Deflexión en el eje y del álabe con alma de 16 mm.  
 Fuente: Elaboración Propia.

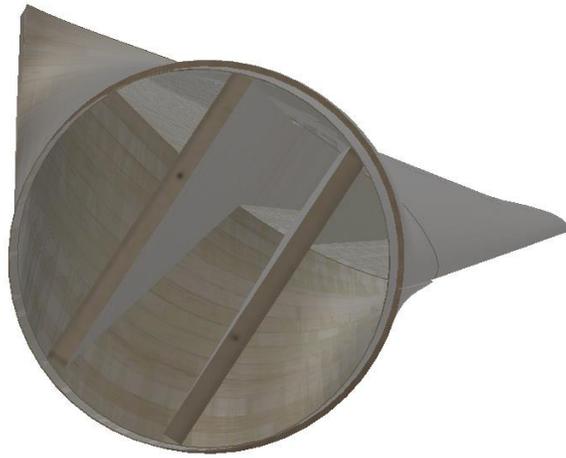


**Figura 3.46** Deflexión en el eje z del álabe con alma de 16 mm.  
 Fuente: Elaboración Propia.

El diseño final se presenta en la **Figura 3.47** y **Figura 3.48**. Este diseño presenta mejores condiciones estructurales y cumple con la normativa con un margen de tolerancia, con dos almas de 16 mm de espesor. Sin embargo, no es el más óptimo debido a que para su construcción requiere mayor material debido a sus dimensiones. Por lo tanto, el diseño óptimo, pese a que se encuentra en ciertos valores límites de deflexión, sería el de cáscara de 7 mm con un alma de 10 mm. Debido a que la condición de carga a la cual está sometiendo es muy insólita e improbable.



**Figura 3.47** Diseño Final de Álabes de Turbina Eólica hecho a base de Stipa Obtusa vista isométrica.  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.48** Diseño Final de Álabes de Turbina Eólica hecho a base de Stipa Obtusa sección transversal.  
Fuente: Elaboración Propia.

## 4 CONCLUSIONES

Para el diseño del álabe se planteó un diseño conceptual inicial. Tras el análisis estructural Aero elástico, se pudo determinar la viabilidad de su uso con material compuesto de *Stipa Obtusa*, pero se tuvieron que realizar modificaciones en el diseño inicial incrementando el espesor del compuesto laminado final e implementando almas longitudinales, debido a que la resistencia a las condiciones de carga expuestas no se encontraba dentro de los rangos establecidos por la normativa. El diseño se realizó bajo los estándares expuestos por la normativa IEC 61400-2, limitando los análisis a casos de carga máxima con un flujo de aire estacionario. Las conclusiones obtenidas se describen continuación:

1. Se realizó el diseño conceptual inicial, considerando la información de perfiles aerodinámicos utilizados en diseños previos, tomando como referencia los álabes de una turbina pequeña de 5kW.
2. El modelo analítico de Blade Element Momentum (BEM) pudo establecer una aproximación inicial de los valores de carga ejercidos en los perfiles aerodinámicos utilizando un método idealizado. Análogamente, el análisis Aero elástico de modelo de viga realizado brindó una aproximación de los valores de esfuerzos obtenidos y su distribución a lo largo del álabe, obteniendo esfuerzos de tracción en la parte superior de 0.46 MPa y de compresión en la parte inferior 0.04905 MPa, propios de la distribución de cargas aerodinámicas en los ejes de coordenadas locales del álabe. La disposición de los laminados se realizó en las direcciones de 0°, 45° y 90°, 135° y 180°, duplicando el número de capas de 0°, 90° y 180°, proporcionando una mayor rigidez, permitiendo una mayor resistencia a la tracción, rotura y deflexión del álabe.
3. El análisis Aero elástico computacional, convergió a valores aproximados previamente en el modelo Aero elástico del método de Viga y BEM. La distribución de presiones a lo largo del álabe, así como el torque generado y la velocidad tangencial en la punta del álabe, convergieron a valores aceptables tomando en consideración las simplificaciones

que aplica el método BEM con una diferencia porcentual en promedio del 60%, la cual para las consideraciones tomadas y la aplicación utilizada fue satisfactoria. Asimismo, el método analítico, permitió reducir el cálculo computacional.

4. Las configuraciones con el alma tubular implementada cumplían con los requerimientos normativos, determinando el más adecuado. El diseño final presenta perfiles aerodinámicos con un espesor de laminado de compuesto de 5 mm, con unas almas de refuerzo de 16 mm la cual brinda rigidez estructural al diseño propuesto, reduciendo la deflexión a valores de dentro de la normativa, produciendo una potencia oscilante de 1 kW en condiciones nominales y durante las velocidades de viento pico, una potencia hasta valores de 5 kW.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. K.Kaldellis y D.Zafirakis, «The wind energy(r)evolution: A short review of a long history,» *El Servier*, p. 15, 2011.
- [2] A. T. A. Ghani Aissaoui, *Wind Turbines. Design, control and applications.*, 2016.
- [3] COES, «Portal Web del COES ( Comité de Operaciones del sistema Interconectado Nacional),» COES, 30 Marzo 2019. [En línea]. Available: <http://www.coes.org.pe/Portal/portalinformacion/generacion>. [Último acceso: Sabado Marzo 2019].
- [4] R. Caminada, «Energías renovables: el desarrollo de la energía eólica en el Perú,» Lima, Universidad San Martin de Porres, 2016, p. 66.
- [5] L. Ferrer Marti, R. Pastor y G. Miquel Capo, «Un modelo de ubicacion de microaerogeneradores para el diseño de proyectos de electrificacion rural con energia eolica.,» *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, p. 10, 2009.
- [6] Waira, «WAIRA Energia y Movilidad Sostenible,» 02 04 2019. [En línea]. Available: <http://waira.com.pe/proyeccion-social/>. [Último acceso: 02 04 2019].
- [7] W. INSTITUTE, «WINDAID INSTITUTE,» WINDAID INSTITUTE, [En línea]. Available: <https://www.windaid.org/enciende-una-vida/>. [Último acceso: Martes Abril 2019].
- [8] L. D. a. F. G. A.K. Mohanty, «Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites,» n° Primera Ed., 2005.
- [9] K. Larsen, «Recycling wind turbine blades,» *Renew. Energy Focus*, vol. 9, n° 7, pp. 70-73, 2009.
- [10] J. J. a. K. Skelton, «Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy,» *Renew. Sustain. Energy rev.*, vol. 97, n° October 2017, pp. 165-176, 2018.
- [11] S. D.U., S. P.J. y C. M.J. , «Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study,» *Compost. PART B*, vol. 52, pp. 172-181, 2013.
- [12] H. J.W. , B. P., S. B.F. , J. Z , S. Z y C. X, «Development of a Bamboo-Based Composite as a Sustainable Green Material for Wind Turbine Blades,» pp. 197-210, 2009.

- [13] W.Tong, Wind power generation and wind turbine design, WIT press, 2010.
- [14] P. a. R. Nijssen, Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials., 2013.
- [15] L. D. A. K. M. a. S. A. S. V. Joshi, «"Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?"», de *Compost.Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, 2004, pp. 371-376.
- [16] D. A., S. T y P. M. , «Wind Turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines,» *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, vol. 175, nº January, pp. 179-192, 2018.
- [17] E. S.P., B. D.R y C. P.D., «Development and experimental verification of a 5kW small wind turbine aeroelastic model,» *J.Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 181, nº August, pp. 104-111, 2018.
- [18] W. D., Small Wind Turbines, 2011.
- [19] S. R. K. y A. M.R., Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications..
- [20] A. S.O., M. S., P. H. y F. J.A., «Comparison of Energy Yield of Small Wind Turbines in Low Wind Speed Areas,» vol. 4, nº 1, pp. 42-49, 2013.
- [21] C. H. e. al, "Structural Design and Manufacturing Process of a Low Scale-Inspired Wind Turbine Blades," *Compos. Struct.*, 2018.
- [22] R. e. a. P.A.C., «The Effects of Blade Pitch Angle on the performance of Small-scale Wind Turbine in Urban Environments,» *Energy*, 2018.
- [23] L. M.O., «Aerodynamics of wind turbines.,» 2015.
- [24] S. M., «Diseño y Construcción de Una Mini Turbina Eólica,» p. 78, 2014.
- [25] L. V., «Wind Power Turbine Design, Selection and Optimization,» 2014.
- [26] S. P.J. y C. R.J., «Wind turbine Blade design,» *Energies*, vol. 5, nº 9, pp. 3425-3449, 2012.
- [27] a. G. D., «Blade System Design Studies Volume I: Composite Technologies for Large Wind Turbine Blades,» *Energy*, vol. 1, nº July, pp. 1-54, 2002.
- [28] B. D., «Design of 9-meter carbon fiberglass prototype blades: CX-100 and TX-100,»

*SAND2007-0201, Sandia Natl. Lab., nº September, 2007.*

- [29] L. R. y M. M., «Fluid dynamics wind turbine design: Critical Analysis, optimization and application of BEM theory,» *Renew. Energy*, vol. 32, nº 14, pp. 2291-2305, 2007.
- [30] E. Branlard, «Blade element momentum(BEM). In wind turbine Aerodynamics and Vorticity-Based Methods,» *Springer*, pp. 181-211, 2017.
- [31] R. D.P, D. M. D. y T. T., «Calculating wind turbine component loads for improved life,» *Renewable Energy*, nº 146, pp. 223-241, 2018.
- [32] a. G. D. y A. T.D., «Alternative Composite Material for Megawatt-Scale Wind Turbine Blades: Design Considerations and Recommended Testing,» *J.Sol. Energy Eng.*, vol. 125, nº 4, p. 515, 2003.
- [33] B. G. y M. P. , «Preliminary Structural Design of Composite Blades for Two-and Three- Blade Rotors,» nº September, p. 30, 2004.
- [34] B. E.J., «Introduction to Composite Materials Design (CRC,2011),» vol. Segunda Edicion, 2011.
- [35] C. S., R. L., P. D., M. J., F. E. y C. S., «Caracterizacion mecanica de las fibras tecnicas de ichu y Cabuya,» 2017.
- [36] S. E.Charca y E. Flores, «Caracterizacion de Propiedades Fisicas y Mecanicas del Poliester,» vol. 2017, 2017.
- [37] S. E.Charca y E. Flores, «Matrices polimericas para materiales compuestos: seleccion,» vol. 2017, 2017.
- [38] D. I.M. y I. O., «ENGINEERING MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS,» *OXFORD UNIVERSITY PRESS*, vol. Second Edi., 2006.
- [39] S. Candiotti, «Caracterización y modelamiento de la fibra de Ichu para su uso como refuerzo en materiales compuestos laminados.,» *Tesis UNI*, 2019.
- [40] M. A. P., *Wind Turbine Technology*, Toronto, New Jersey, 2014.
- [41] I. E. C. «IEC 61400-2,» vol. 3, nº 2006, p. 92.
- [42] A. J. P.D., *Wind Turbine Technology*, 2011.

- [43] S. F., N. V., S. K. y A. B., «Determination of Elastic Twist in Horizontal Axis Wind Turbines (HAWTs) Final report: August 1989 Determination of Elastic Twist in Horizontal Axis Wind Turbines (HAWTs) Final report: August 1989,» *Renew. Energy*, n° June, 2006.
- [44] J. M., P. M. y M. A., «Optimisation of wind turbine blades,» *J. Mater. Process. Technol*, vol. 167, n° 2-3, pp. 463-471, 2005.
- [45] K. C., B. J. y S. Y., «Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life,» *Energy*, vol. 30, n° 11-12 SPEC. ISS., pp. 2101-2114, 2005.
- [46] R. U., «NUIVIAO Usel,» *Wind Energy*, n° August, 2001.
- [47] DePeru.com, «DePeru.com,» 02 04 2019. [En línea]. Available: <https://www.deperu.com/centros-poblados/ayahuasan-49231>. [Último acceso: 02 04 2019].
- [48] SENAMHI, «www.SENAMHI.gob.pe,» 2018. [En línea]. Available: [https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-estaciones/\\_dat\\_esta\\_tipo.php?estaciones=000659](https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-estaciones/_dat_esta_tipo.php?estaciones=000659). [Último acceso: 02 04 2019].
- [49] AirfoilTools, «AirfoilTools,» [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>. [Último acceso: 02 04 2019].
- [50] G. Fernandez, U. H. y V. D., «An efficient procedure for the calculation of the stress distribution in a wind turbine blade under aerodynamic loads,» vol. 172, n° May 2017, pp. 42-54, 2018.
- [51] K. Y , T. L, A. F y B. , «Efficiency of a small wind turbine using BEM and CFD,» 2018.
- [52] C. Argyropoulos y N. Markatos, «Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows,» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, pp. 693-732, 2015.
- [53] S. Obeid , R. Jha y G. Ahmadi, «RANS Simulations of Aerodynamic Performance of NACA 0015 Flapped Airfoil,» *fluids*, p. 27, 2017.
- [54] B. M.E y C. D., «STRUCTURAL DESIGN OF A COMPOSITE WIND TURBINE USING FINITE ELEMENT METHOD,» vol. 63, n° 3, 1997.
- [55] S. Gagan y R. R.K., «Determination of Torque Produced by Horizontal Axis Wind Turbine Blade Using FSI Analysis for Low Wind Speed Regime,» *IJISSET- International Journal of Innovative Science*, vol. 2, n° 5, p. 5, 2015.

- [56] M. Numan Kaya, F. Kose, D. Ingham, L. Ma y M. Pourkashanian, «Aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine with forward and backward sweep blades,» *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, nº 176, pp. 166-173, 2018.
- [57] K. Cox y A. Echtermeyerb, «Structural design and analysis of a 10MW wind turbine blade,» *Energy Procedia*, vol. 24, pp. 194-201, 2012.

## ANEXOS

### Anexo 1 Tabla de Mediciones de Velocidades en Estación Acobamba, en el Periodo Enero-noviembre 2018

Estación Acobamba Meteorológica Altitud: 3236 m																					
Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)		
1-Nov-18	4	1-Oct-18	6	01-Sep-2018	4	1-Ago-18	8	1-Jul-18	4	1-Jun-18	6	2-May-18	2	1-Abr-18	4	1-Mar-18	4	1-Feb-18	4	1-Ene-18	6
2-Nov-18	6	2-Oct-18	6	02-Sep-2018	6	2-Ago-18	6	2-Jul-18	4	2-Jun-18	4	3-May-18	2	2-Abr-18	4	2-Mar-18	2	2-Feb-18	2	2-Ene-18	4
3-Nov-18	2	3-Oct-18	4	03-Sep-2018	6	3-Ago-18	2	3-Jul-18	2	3-Jun-18	2	4-May-18	2	3-Abr-18	2	3-Mar-18	2	3-Feb-18	2	3-Ene-18	4
4-Nov-18	6	4-Oct-18	4	04-Sep-2018	4	4-Ago-18	2	4-Jul-18	6	4-Jun-18	2	7-May-18	2	4-Abr-18	2	4-Mar-18	2	4-Feb-18	2	4-Ene-18	2
5-Nov-18	6	5-Oct-18	4	05-Sep-2018	2	5-Ago-18	2	5-Jul-18	4	5-Jun-18	4	8-May-18	6	5-Abr-18	4	6-Mar-18	4	5-Feb-18	4	5-Ene-18	4
6-Nov-18	2	10-Oct-18	6	06-Sep-2018	4	6-Ago-18	8	6-Jul-18	2	6-Jun-18	4	9-May-18	6	6-Abr-18	6	7-Mar-18	2	6-Feb-18	4	6-Ene-18	4
7-Nov-18	4	11-Oct-18	6	07-Sep-2018	2	7-Ago-18	6	7-Jul-18	2	7-Jun-18	4	12-May-18	4	7-Abr-18	4	8-Mar-18	2	7-Feb-18	2	7-Ene-18	4
8-Nov-18	6	12-Oct-18	4	08-Sep-2018	4	8-Ago-18	4	8-Jul-18	4	8-Jun-18	6	13-May-18	4	10-Abr-18	2	9-Mar-18	2	8-Feb-18	8	10-Ene-18	2
9-Nov-18	2	13-Oct-18	2	09-Sep-2018	4	9-Ago-18	2	9-Jul-18	4	9-Jun-18	2	14-May-18	2	11-Abr-18	4	10-Mar-18	4	9-Feb-18	6	11-Ene-18	4
10-Nov-18	6	14-Oct-18	4	10-Sep-2018	2	11-Ago-18	6	10-Jul-18	6	10-Jun-18	4	15-May-18	2	12-Abr-18	2	11-Mar-18	2	10-Feb-18	2	12-Ene-18	4
12-Nov-18	2	15-Oct-18	4	11-Sep-2018	2	12-Ago-18	4	11-Jul-18	8	11-Jun-18	2	16-May-18	4	13-Abr-18	2	12-Mar-18	4	11-Feb-18	2	13-Ene-18	2
13-Nov-18	4	16-Oct-18	6	12-Sep-2018	6	13-Ago-18	6	12-Jul-18	2	12-Jun-18	4	17-May-18	4	14-Abr-18	8	13-Mar-18	6	12-Feb-18	2	15-Ene-18	8
14-Nov-18	4	17-Oct-18	2	13-Sep-2018	6	14-Ago-18	6	14-Jul-18	4	13-Jun-18	8	18-May-18	2	15-Abr-18	4	14-Mar-18	4	13-Feb-18	2	16-Ene-18	2
15-Nov-18	6	18-Oct-18	4	14-Sep-2018	6	15-Ago-18	6	15-Jul-18	4	14-Jun-18	8	19-May-18	4	16-Abr-18	2	15-Mar-18	2	14-Feb-18	2	19-Ene-18	6
16-Nov-18	2	19-Oct-18	4	15-Sep-2018	4	16-Ago-18	6	16-Jul-18	6	15-Jun-18	2	20-May-18	4	17-Abr-18	2	16-Mar-18	6	15-Feb-18	6	20-Ene-18	2
18-Nov-18	4	20-Oct-18	6	16-Sep-2018	6	17-Ago-18	6	18-Jul-18	6	16-Jun-18	8	21-May-18	4	18-Abr-18	2	17-Mar-18	2	17-Feb-18	6	21-Ene-18	2
19-Nov-18	2	22-Oct-18	4	17-Sep-2018	2	18-Ago-18	4	21-Jul-18	2	17-Jun-18	8	22-May-18	6	19-Abr-18	4	18-Mar-18	4	18-Feb-18	4	23-Ene-18	2
21-Nov-18	4	23-Oct-18	4	18-Sep-2018	6	20-Ago-18	2	23-Jul-18	6	18-Jun-18	6	23-May-18	2	20-Abr-18	2	19-Mar-18	2	19-Feb-18	2	24-Ene-18	4
24-Nov-18	4	24-Oct-18	6	19-Sep-2018	6	21-Ago-18	6	24-Jul-18	4	19-Jun-18	6	24-May-18	6	21-Abr-18	6	20-Mar-18	6	20-Feb-18	6	25-Ene-18	2

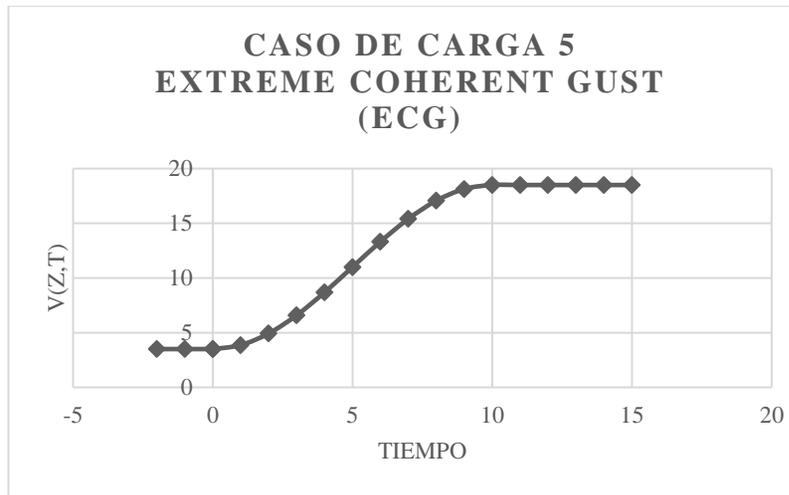
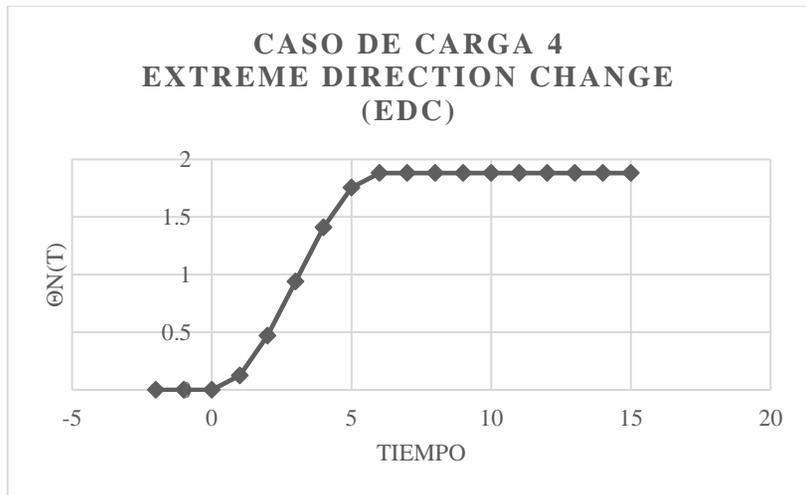
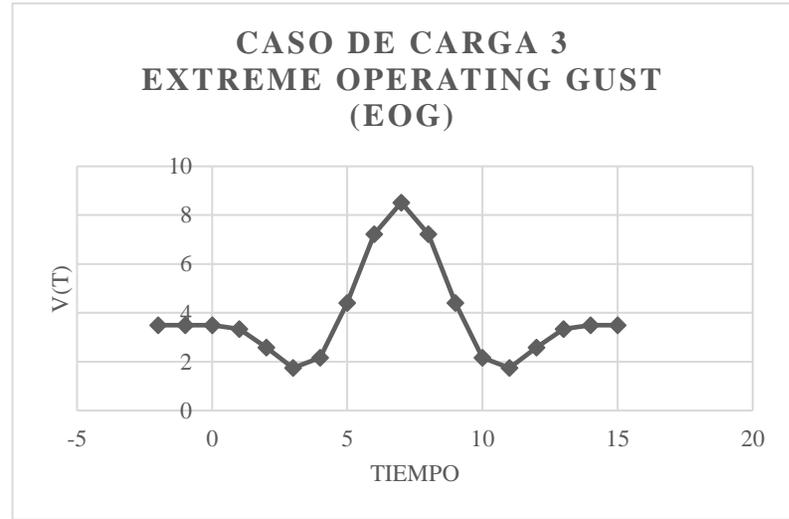
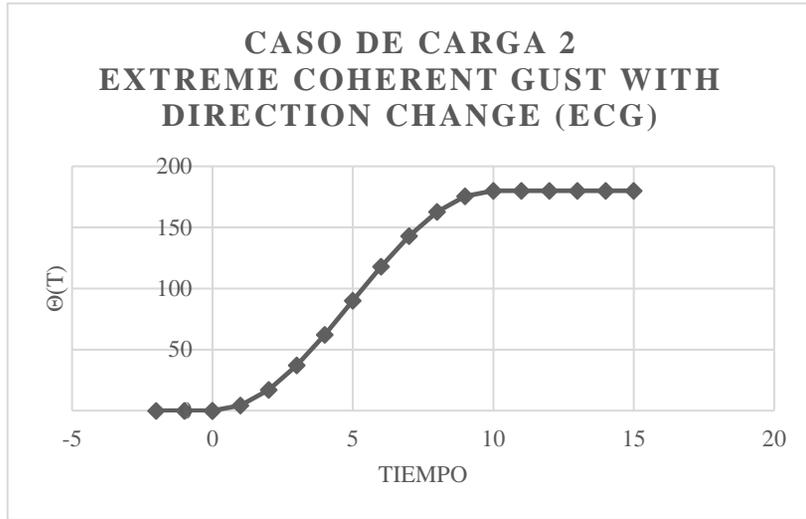
**Estación Acobamba Meteorológica Altitud: 3236 m**

Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)	Fecha	Velocidad del Viento 13h (m/s)
25-Nov-18	8	25-Oct-18	2	20-Sep-2018	8	22-Ago-18	4	25-Jul-18	4	20-Jun-18	4	25-May-18	4	22-Abr-18	4	21-Mar-18	4	21-Feb-18	2	27-Ene-18	2
26-Nov-18	4	26-Oct-18	4	21-Sep-2018	8	23-Ago-18	2	26-Jul-18	6	21-Jun-18	6	26-May-18	4	23-Abr-18	6	22-Mar-18	2	22-Feb-18	4	28-Ene-18	2
27-Nov-18	2	27-Oct-18	4	22-Sep-2018	8	24-Ago-18	4	27-Jul-18	2	22-Jun-18	4	27-May-18	4	24-Abr-18	6	23-Mar-18	4	23-Feb-18	2	29-Ene-18	6
28-Nov-18	2	29-Oct-18	6	23-Sep-2018	6	25-Ago-18	4	29-Jul-18	2	23-Jun-18	4	28-May-18	4	25-Abr-18	4	24-Mar-18	2	24-Feb-18	2	30-Ene-18	2
29-Nov-18	6	30-Oct-18	2	24-Sep-2018	4	26-Ago-18	4	30-Jul-18	2	24-Jun-18	4	29-May-18	2	26-Abr-18	6	25-Mar-18	2	25-Feb-18	6	31-Ene-18	2
		31-Oct-18	4	25-Sep-2018	2	27-Ago-18	2	31-Jul-18	4	26-Jun-18	4	30-May-18	6	27-Abr-18	2	26-Mar-18	6	27-Feb-18	4		
				26-Sep-2018	2	28-Ago-18	6			27-Jun-18	8	31-May-18	6	29-Abr-18	2	27-Mar-18	4	28-Feb-18	4		
				27-Sep-2018	6	29-Ago-18	2			28-Jun-18	2			30-Abr-18	4	28-Mar-18	2				
				28-Sep-2018	6	30-Ago-18	2			29-Jun-18	4					29-Mar-18	2				
				29-Sep-2018	4	31-Ago-18	6			30-Jun-18	2					30-Mar-18	6				
				30-Sep-2018	4					31-Jul-18	4					31-Mar-18	2				

## Anexo 2 Coordenadas Paramétricas de Perfiles Aerodinámicos.

NACA 64(4)-221				NACA 63(3)-218			
xc	yc	xc	yc	xc	yc	xc	yc
1	0	0.00638	-0.0159	1	0	0.00618	-0.01349
0.95021	0.00765	0.00904	-0.01909	0.95016	0.00664	0.00883	-0.01638
0.90044	0.01761	0.01425	-0.02404	0.90034	0.01501	0.01404	-0.02105
0.85061	0.02885	0.02703	-0.03293	0.85049	0.02459	0.02681	-0.02913
0.80073	0.04082	0.05228	-0.0455	0.80059	0.03486	0.05204	-0.04041
0.75077	0.0531	0.07736	-0.05486	0.75064	0.04544	0.07712	-0.0488
0.70075	0.06521	0.10237	-0.06248	0.70062	0.05594	0.10212	-0.05547
0.65065	0.07679	0.15224	-0.07432	0.65055	0.06597	0.15199	-0.06549
0.6005	0.08749	0.20201	-0.08297	0.60042	0.07526	0.20178	-0.0725
0.55027	0.09702	0.25171	-0.08911	0.55023	0.08351	0.2515	-0.07704
0.5	0.10507	0.30139	-0.09296	0.5	0.09045	0.3012	-0.0794
0.44968	0.11125	0.35103	-0.0945	0.44973	0.09577	0.35089	-0.0797
0.39933	0.11502	0.40067	-0.0936	0.39943	0.09916	0.40057	-0.07774
0.34897	0.1151	0.45032	-0.08935	0.34911	0.1003	0.45027	-0.07387
0.29861	0.1124	0.5	-0.08301	0.2988	0.09884	0.5	-0.06839
0.24829	0.10701	0.54973	-0.07512	0.2485	0.09949	0.54977	-0.06161
0.19799	0.09889	0.5995	-0.06607	0.19822	0.08842	0.59958	-0.05384
0.14776	0.08778	0.64935	-0.05619	0.14801	0.07895	0.64945	-0.04537
0.09765	0.07282	0.69925	-0.04577	0.09788	0.06581	0.69938	-0.0365
0.07264	0.06334	0.74923	-0.0352	0.07288	0.05728	0.74936	-0.02754
0.04772	0.05182	0.79927	-0.0249	0.04796	0.04673	0.79941	-0.01894
0.02297	0.03665	0.84939	-0.01539	0.02319	0.03285	0.84951	-0.01113
0.01075	0.02618	0.89956	-0.00727	0.01096	0.02319	0.89966	-0.00467
0.00596	0.02049	0.94979	-0.00133	0.00617	0.01778	0.94984	-0.00032
0.00362	0.0169	1	0	0.00382	0.01449	1	0
0	0			0	0	0.00618	-0.01349
						0.00883	-0.01638
						0.01404	-0.02105

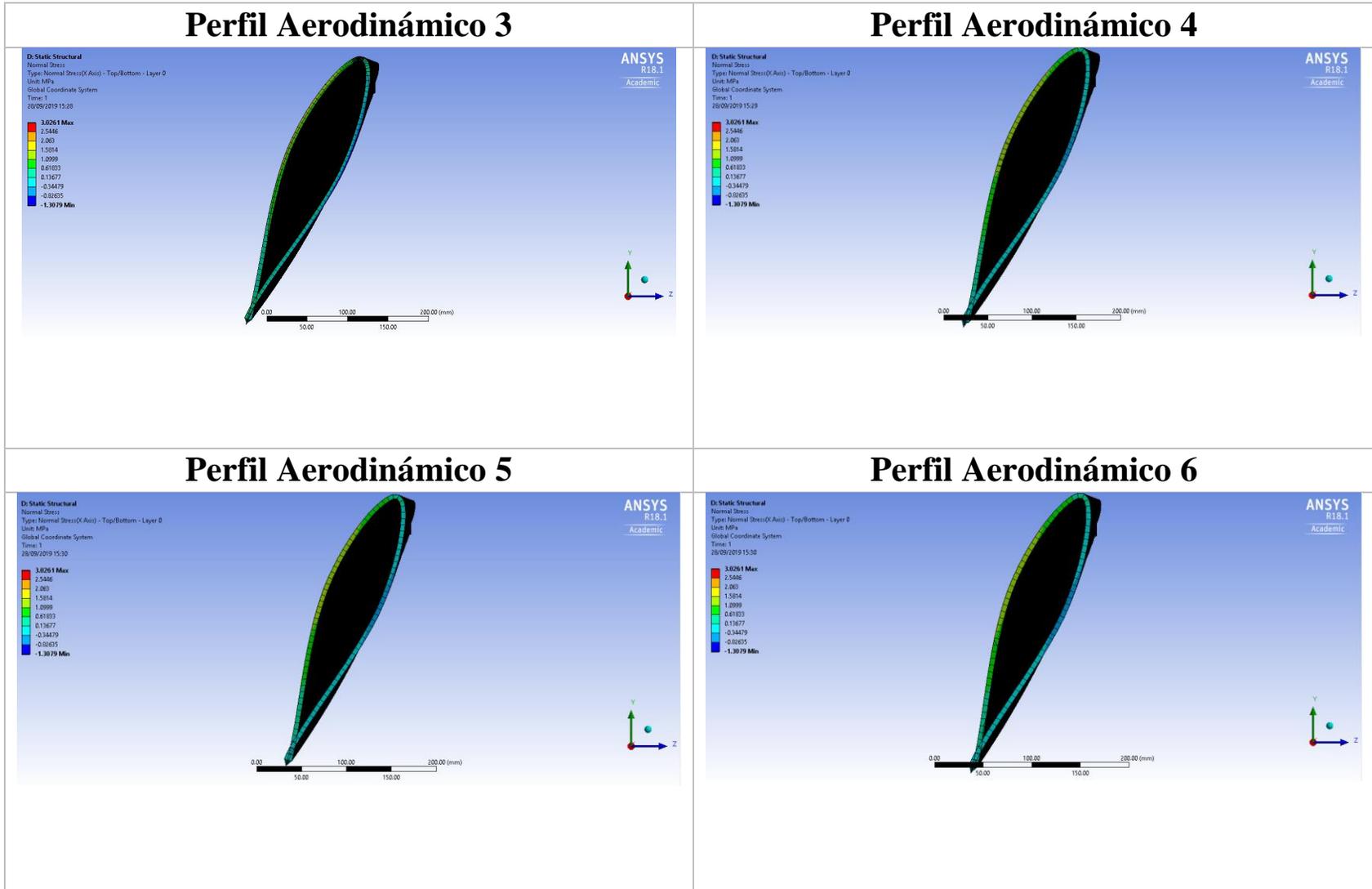
### Anexo 3 Distribución de Velocidades para cada caso de carga.



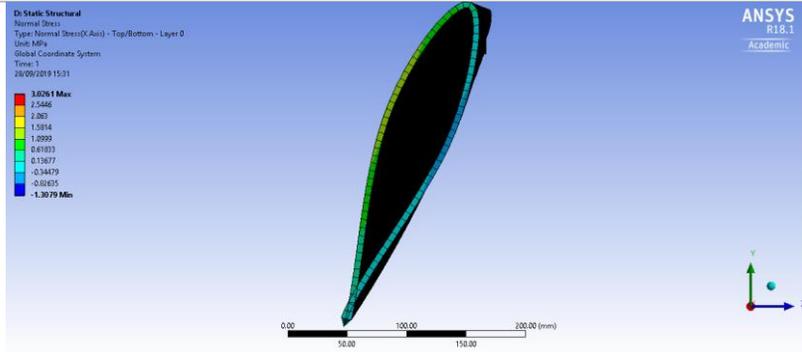
## Anexo 4 Propiedades Geométricas e Inerciales de los Perfiles Aerodinámicos.

Perfil Aerodinámico	Longitud de Cuerda (m)	Angulo de Inclinación (°)	Espesor de perfil Aerodinámico (m)	Área de Sección Transversal (m <sup>2</sup> )	Módulo Elástico (GPa) 1*10e10	Módulo Elástico por Área. (N) 1*e7	Centro Elástico Coord. X	Centro Elástico Coord. Y	Rigidez con respecto al eje X (N.m2) 1e5	Rigidez con respecto al eje Y (N.m2) 1e5	Rigidez Torsional con respecto al eje XY (N.m2) 1e5	Angulo de desfase entre coord. Locales y generales. °	Rigidez Alrededor el eje Principal (Nm2)1e5	Rigidez Alrededor del eje Principal 2(N.m2) 1e5
1	0.2830	0	0.0050	0.0044	1.1000	4.8863	5.1415	5.0000	4.8713	4.8690	0	0	4.8713	4.8690
2	0.2830	0	0.0050	0.0044	1.1000	4.8863	5.1415	5.0000	4.8713	4.8690	0	0	4.8713	4.8690
3	0.3605	24.0000	0.0050	0.0037	1.1000	4.1221	5.1598	5.0744	0.9997	3.9220	1.6191	23.9677	0.2800	4.6417
4	0.3425	23.3684	0.0050	0.0036	1.1000	3.9160	5.1526	5.0690	0.8268	3.3929	1.3602	23.3361	0.2400	3.9797
5	0.3245	22.7368	0.0050	0.0034	1.1000	3.7099	5.1453	5.0638	0.6778	2.9101	1.1322	22.7046	0.2041	3.3838
6	0.3064	22.1053	0.0050	0.0032	1.1000	3.5038	5.1379	5.0587	0.5502	2.4723	0.9328	22.0730	0.1719	2.8506
7	0.2884	21.4737	0.0050	0.0030	1.1000	3.2977	5.1304	5.0538	0.4418	2.0781	0.7599	21.4414	0.1433	2.3766
8	0.2704	20.8421	0.0050	0.0028	1.1000	3.0916	5.1228	5.0491	0.3504	1.7260	0.6111	20.8098	0.1181	1.9582
9	0.2524	20.2105	0.0050	0.0026	1.1000	2.8855	5.1151	5.0446	0.2740	1.4141	0.4844	20.1783	0.0960	1.5921
10	0.2343	19.5789	0.0050	0.0024	1.1000	2.6794	5.1073	5.0402	0.2110	1.1406	0.3777	19.5467	0.0769	1.2747
11	0.2163	18.9474	0.0050	0.0022	1.1000	2.4732	5.0995	5.0360	0.1595	0.9036	0.2889	18.9151	0.0605	1.0026
12	0.1983	18.3158	0.0050	0.0021	1.1000	2.2671	5.0915	5.0320	0.1180	0.7008	0.2162	18.2835	0.0466	0.7723
13	0.1803	17.6842	0.0050	0.0019	1.1000	2.0610	5.0835	5.0282	0.0851	0.5301	0.1575	17.6519	0.0350	0.5802
14	0.1622	17.0526	0.0050	0.0017	1.1000	1.8549	5.0755	5.0245	0.0596	0.3889	0.1112	17.0204	0.0255	0.4230
15	0.1442	16.4211	0.0050	0.0015	1.1000	1.6488	5.0673	5.0211	0.0401	0.2748	0.0756	16.3888	0.0179	0.2971
16	0.1262	15.7895	0.0050	0.0013	1.1000	1.4427	5.0591	5.0178	0.0258	0.1852	0.0489	15.7572	0.0120	0.1990
17	0.1082	15.1579	0.0050	0.0011	1.1000	1.2271	5.0510	5.0147	0.0136	0.1155	0.0297	15.1086	0.0056	0.1235
18	0.0901	14.5263	0.0050	0.0009	1.1000	1.0226	5.0426	5.0118	0.0075	0.0672	0.0165	14.4770	0.0032	0.0715
19	0.0721	13.8947	0.0050	0.0007	1.1000	0.8181	5.0342	5.0091	0.0037	0.0346	0.0081	13.8454	0.0017	0.0366
20	0.0541	13.2632	0.0050	0.0006	1.1000	0.6135	5.0257	5.0065	0.0015	0.0147	0.0033	13.2138	0.0007	0.0154
21	0.0361	12.6316	0.0050	0.0004	1.1000	0.4090	5.0172	5.0042	0.0004	0.0044	0.0009	12.5822	0.0002	0.0046
22	0.0200	12.0000	0.0050	0.0002	1.1000	0.2269	5.0096	5.0022	0.0001	0.0007	0.0002	11.9507	0.0000	0.0008

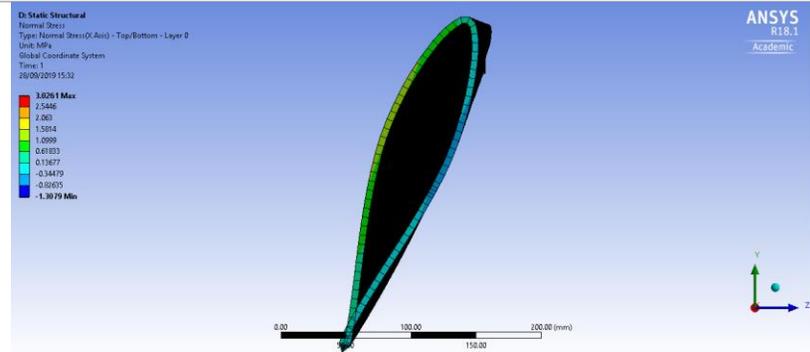
# Anexo 5 Esfuerzos Longitudinales en Perfiles Aerodinámicos



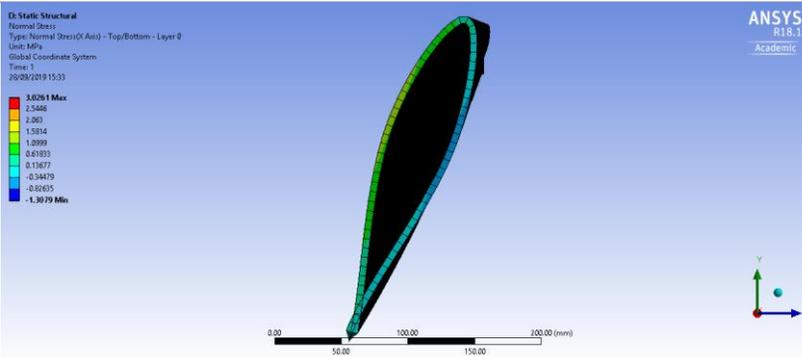
## Perfil Aerodinámico 7



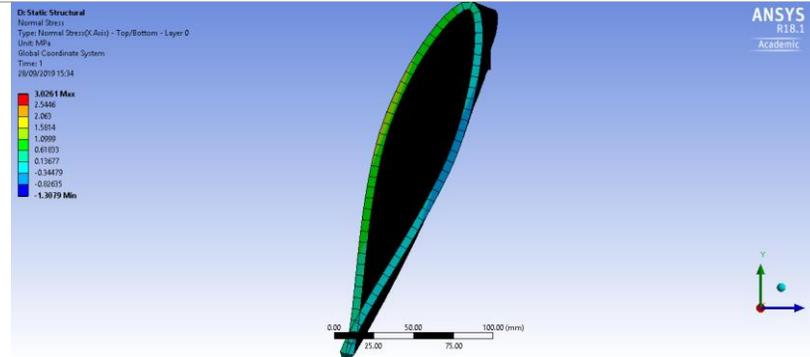
## Perfil Aerodinámico 8



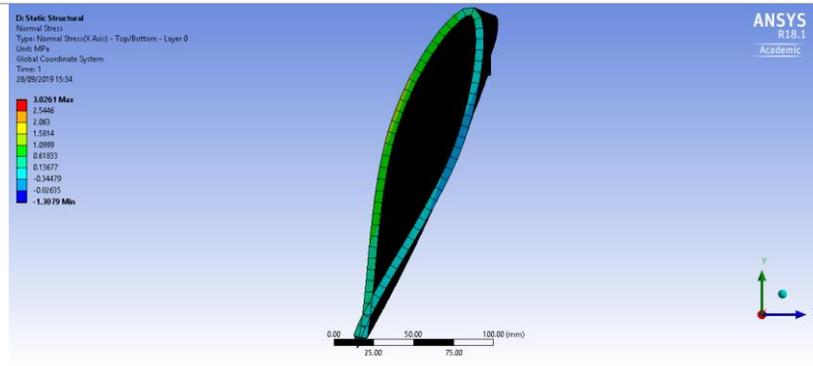
## Perfil Aerodinámico 9



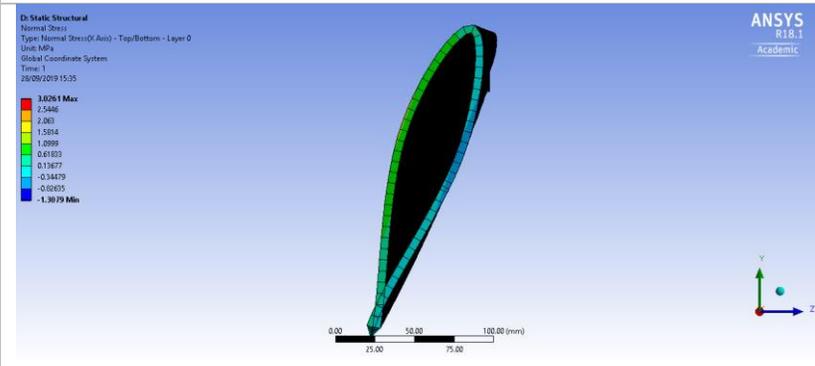
## Perfil Aerodinámico 10



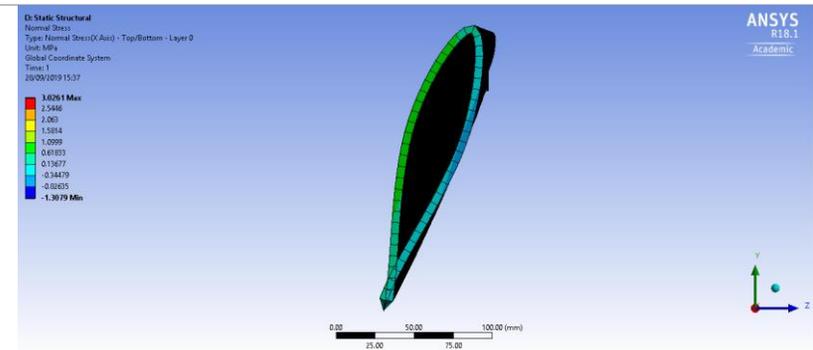
## Perfil Aerodinámico 11



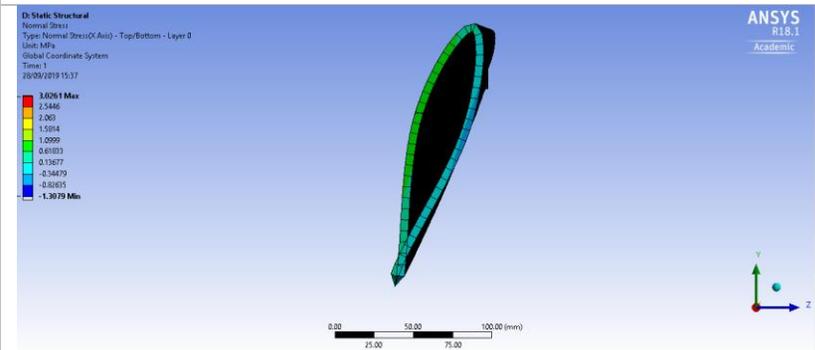
## Perfil Aerodinámico 12



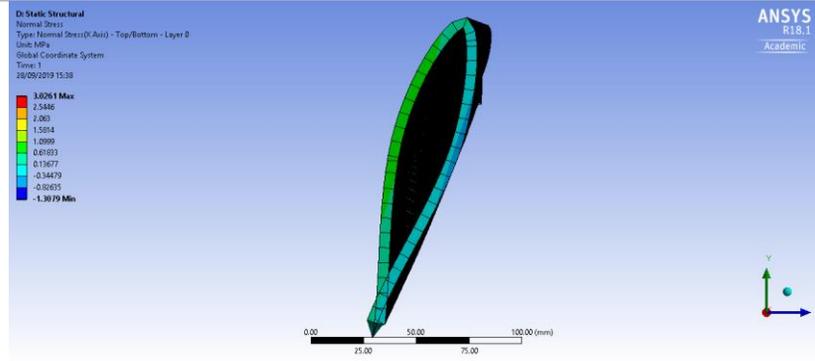
## Perfil Aerodinámico 13



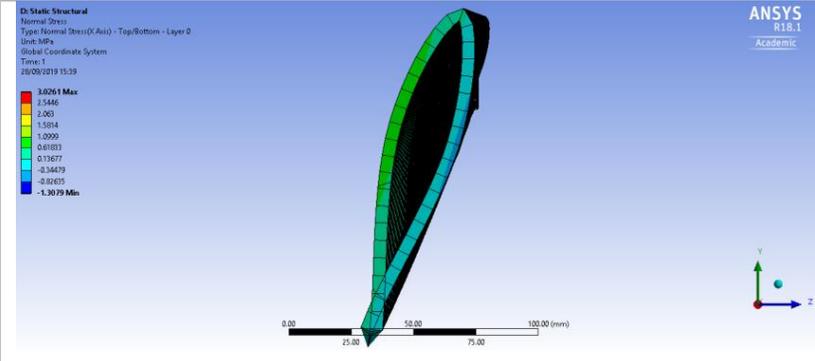
## Perfil Aerodinámico 14



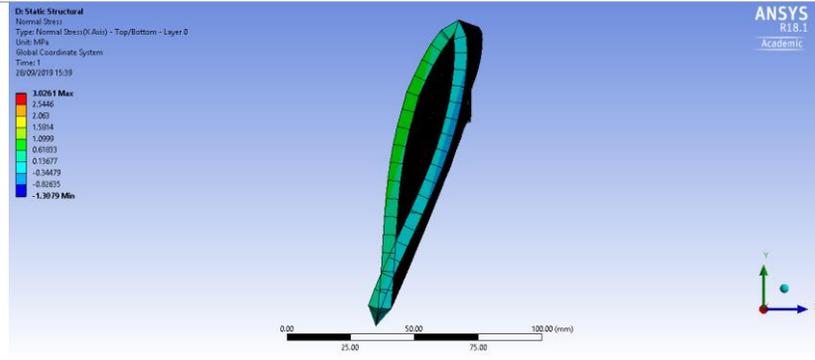
## Perfil Aerodinámico 15



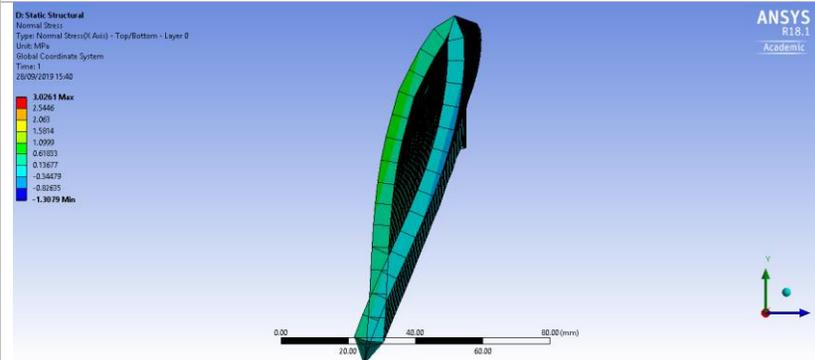
## Perfil Aerodinámico 16



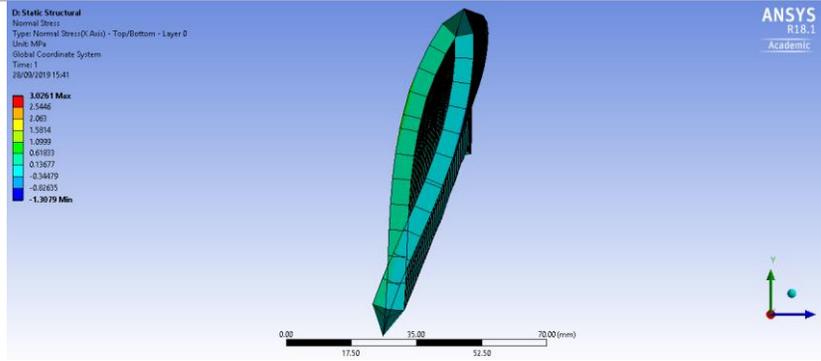
## Perfil Aerodinámico 17



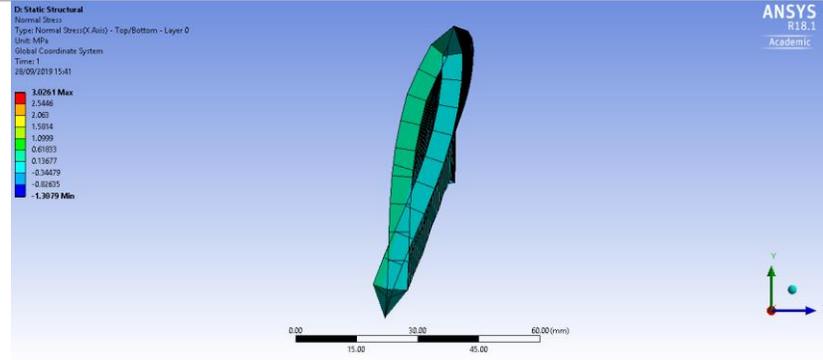
## Perfil Aerodinámico 18



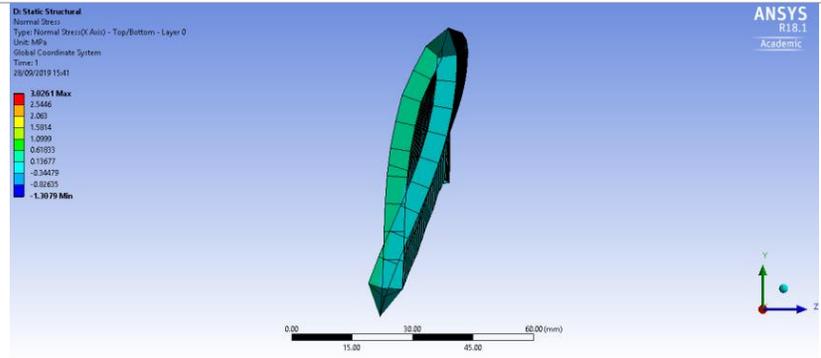
## Perfil Aerodinámico 19



## Perfil Aerodinámico 20



## Perfil Aerodinámico 21



## Anexo 6 Código de Método Analítico BEM en MATLAB

```
%Numero de Iteraciones
IT=10;
%Numero de Perfiles
P=22;
%Number of Blades
B=1;
%Propiedades del Aire a 300K = 25C°
%Viscosidad Cinematica m^2/s
vk=15.89*10^-6;
%Densidad del Aire
dens= 1.225;
%Factores de Induccion
a=zeros(IT,P);
a_t=zeros(IT,P);
%Velocidad del Viento m/s
V_o=3.5;
%Velocidad Angular del rotor rad/s
landa=8;
%Angulo de Giro
twist_angle=xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','B9:W9');
%Longitudes de Radio
R=xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','B7:W7');
%Chord Lenght
C=xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','B8:W8');
%Coeficiente de Empuje y Arrastre
Cff=xlsread('Perfiles.xlsx','Coeficientes
Aerodinamicos','A3:F114');
Cl=zeros(IT,P);
Cd=zeros(IT,P);
%Matrices
Cn=zeros(IT,P);
Ct=zeros(IT,P);
theta=zeros(IT,P);
alpha=zeros(IT,P);
sigma=zeros(IT,P);
Reynold=zeros(1,P);
w_o = zeros(1,P);
F = zeros(IT,P);
G = zeros(IT,P);
Fz=[zeros(1,P)];
```

```

Fy=[zeros(1,P)];
Ty=[zeros(1,P)];
Tz=[zeros(1,P)];
Pt=[zeros(1,P)];
Pn=[zeros(1,P)];
Cp_1=zeros(1,P);
Diff=zeros(112,1);

for w=2:1:IT
for i=1:1:P
    %Step 1
    Reynold(1,i)=V_o*C(1,i)/vk;
    w_o(1,i)=landa*V_o/R(1,P);
    %Step 2
    theta(w,i)=rad2deg(atan(((1-a(w-
1,i))*V_o)/((1+a_t(w-1,i))*R(1,i)*w_o(1,i))));
    %Step 3 lift and Drag Coefficientes
    alpha(w,i)=theta(w,i)-twist_angle(1,i);
    %Step 4 Find Cl and Cd
    if (i<3)&&(i>0)
        Cl(w,i)=0;
        Cd(w,i)=0;
    end
    if (i<17)&&(i>2)
        for r=1:1:112
            Diff(r,1)=abs(Cff(r,1)-alpha(w,i));
        end
        [I,k]=min(Diff);
        Cl(w,i)=Cff(k,2);
        Cd(w,i)=Cff(k,3);
    end
    if (i>16)
        for r=1:1:112
            Diff(r,1)=abs(Cff(r,4)-alpha(w,i));
        end
        [I,k]=min(Diff);
        Cl(w,i)=Cff(k,5);
        Cd(w,i)=Cff(k,6);
    end
    %Step 5 Calculo de Coeficientes

```

```

    Cn(w,i)=
    Cl(w,i)*cos(deg2rad(theta(w,i)))+Cd(w,i)*sin(deg2rad(theta(w,i)));
    Ct(w,i)= Cl(w,i)*sin(deg2rad(theta(w,i)))-
    Cd(w,i)*cos(deg2rad(theta(w,i)));
    %Solidity
    sigma(1,i)=(C(1,i)*B)/(2*pi*R(1,i));
    %Facotr de Correccion de Prandtl
    f=B/2*( (R(1,P)-
    R(1,i))/(R(1,i)*sin(deg2rad(theta(w,i)))));
    F(w,i)=(2/pi)*cos(exp(-f));
    %Coeficientes de Arrastre y Torque
    Un(w,i)=V_o*(1-a(w,i));
    Ut(w,i)=w_o(1,i)*R(1,i)*(1+a_t(w,i));
    CT(w,i)=(Un(w,i)^2+Ut(w,i)^2)/V_o^2*sigma(1,i)*
    Cn(w,i);
    CQ(w,i)=(Un(w,i)^2+Ut(w,i)^2)/V_o^2*sigma(1,i)*
    Ct(w,i);
    ac=0.2;
    %Calculo de factores de induccion
    a(w,i)=
    1/(((4*F(w,i)*(sin(deg2rad(theta(w,i))))^2)/(Cn(w,i)*sigma(1,i)))+1);

    a_t(w,i)=1/(((4*F(w,i)*sin(deg2rad(theta(w,i))))*cos(deg2rad(theta(w,i))))/(Ct(w,i)*sigma(1,i)))-1);
    if a(w,i)>ac

    K=(4*F(w,i)*sin(deg2rad(theta(w,i))))^2/((sigma(1,i)*Cn(w,i)));
    a(w,i)=0.5*(2+K*(1-2*ac)-((K*(1-2*ac)+2)^2+4*(K*ac^2-1))^0.5);
    end
    %Calculo de CP
    Cp_1(1,i)=4*a(IT,i)*(1-a(IT,i))^2;
end
end
%FUERZAS
for w=2:1:IT
for j=P:-1:2
    %Fuerzas de Arrastre Fz2

```

```

    Fz(1,j-1)= Fz(1,j)-(0.5*dens*B*((V_o^2*(1-
a(w,j))^2)/(sin(deg2rad(theta(w,j))))^2)*C(1,j)*Cn(w,j)*
(R(1,j)-R(1,j-1)));
    %Fuerza de Empuje Fy2
    Fy(1,j-1)= Fy(1,j)-(0.5*dens*B*((V_o*(1-
a(w,j))*w_o(1,j)*(1-
a_t(w,j)))/((sin(deg2rad(theta(w,j))))*cos(deg2rad(theta
(w,j)))))*C(1,j)*Ct(w,j)*0.5*(R(1,j)^2-R(1,j-1)^2));
    % Fuerza en las raices es 0
    Fz(1,2)=0;
    Fz(1,1)=0;
    Fy(1,2)=0;
    Fy(1,1)=0;
    %Fuerza de Torque generado por Fz2
    Ty(1,j-1)= Ty(1,j)-(0.5*dens*B*((V_o^2*(1-
a(w,j))^2)/(sin(deg2rad(theta(w,j))))^2)*C(1,j)*Cn(w,j)*
0.5*(R(1,j)^2-R(1,j-1)^2));
    %Torque Generado por la Fuerza Fy2
    Tz(1,j-1)= Tz(1,j)-(0.5*dens*B*((V_o*(1-
a(w,j))*w_o(1,j)*(1-
a_t(w,j)))/((sin(deg2rad(theta(w,j))))*cos(deg2rad(theta
(w,j)))))*C(1,j)*Ct(w,j)*1/3*(R(1,j)^3-R(1,j-1)^3));
end
end
%Fuerzas por Unidad de Longitud
for w=2:1:IT
for t=1:1:P
    %Fuerza por Unidad de empuje PN
    Pn(1,t)=(0.5*dens*B*((V_o^2*(1-
a(w,t))^2)/(sin(deg2rad(theta(w,t))))^2)*C(1,t)*Cn(w,t))
;
    %Fuerza por Unidad de Arrastre PT
    Pt(1,t)=(0.5*dens*B*((V_o*(1-a(w,t))*w_o(1,t)*(1-
a_t(w,t)))/((sin(deg2rad(theta(w,t))))*cos(deg2rad(theta
(w,t)))))*C(1,t)*Ct(w,t));
end
end

```

## Anexo 7 Código de Método Analítico de Teoría de Viga en MATLAB

```
clear all
close all
clc
%Constantes
E=11e9;
Refx=5;
Refy=5;
LC=xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','B8:W8');
theta=xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','B9:W9');
R=xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','B7:w7');
Thickness=xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','B10:w10');
I1= xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','A17:AR41');
I2= xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','A45:AR69');
nodeCoordinates=[I1;I2];
w_o= xlsread('Perfiles.xlsx','Perfiles','E4');
ro=1313.25;
numberNodes=size(nodeCoordinates,1);
P=22;
Data = zeros(numberNodes,8*P);
Radio = zeros(numberNodes,P);
PTP=zeros(14,P);

%ITERACION PERFILES Y PROPIEDADES
for z=1:1:P
    %Iteracion X,Y y Z
    for i=1:1:numberNodes
        Data(i,1+(8*(z-1))) = ((nodeCoordinates(i,1+(2*(z-1))) *LC(1,z))^2+(nodeCoordinates(i,2+(2*(z-1))) *LC(1,z))^2)^0.5*cos(atan(...
            (nodeCoordinates(i,2+(2*(z-1))) *LC(1,z)) / (nodeCoordinates(i,1+(2*(z-1))) *LC(1,z))) +deg2rad(theta(1,z))) +Refx;
        Data(i,2+(8*(z-1))) = ((nodeCoordinates(i,1+(2*(z-1))) *LC(1,z))^2+(nodeCoordinates(i,2+(2*(z-1))) *LC(1,z))^2)^0.5*sin(atan(...
            (nodeCoordinates(i,2+(2*(z-1))) *LC(1,z)) / (nodeCoordinates(i,1+(2*(z-1))) *LC(1,z))) +deg2rad(theta(1,z))) +Refy;
```

```

        Radio(i, z)=R(1, z);
end
    %Iteracion Propiedades Geometricas
for i=2:1:numberNodes
    %Sumatoria de Area
    Data(i, 3+(8*(z-1))) = ((Data(i, 1+(8*(z-1)))-Data(i-1, 1+(8*(z-1))))^2+(Data(i, 2+(8*(z-1)))-Data(i-1, 2+(8*(z-1))))^2)^0.5*Thickness(1, z);
    Data(i, 4+(8*(z-1))) = Data(i, 3+(8*(z-1))) * ((Data(i, 2+(8*(z-1)))+Data(i-1, 2+(8*(z-1))))/2) * E;
    Data(i, 5+(8*(z-1))) = Data(i, 3+(8*(z-1))) * ((Data(i, 1+(8*(z-1)))+Data(i-1, 1+(8*(z-1))))/2) * E;
    Data(i, 6+(8*(z-1))) = Data(i, 3+(8*(z-1))) * ((Data(i, 2+(8*(z-1)))+Data(i-1, 2+(8*(z-1))))/2)^2 * E;
    Data(i, 7+(8*(z-1))) = Data(i, 3+(8*(z-1))) * ((Data(i, 1+(8*(z-1)))+Data(i-1, 1+(8*(z-1))))/2)^2 * E;
    Data(i, 8+(8*(z-1))) = Data(i, 3+(8*(z-1))) * ((Data(i, 1+(8*(z-1)))+Data(i-1, 1+(8*(z-1))))/2) * ((Data(i, 2+(8*(z-1)))+Data(i-1, 2+(8*(z-1))))/2) * E;
end

%Iteracion Propiedades Mecanicas y Geometricas
    %Longitud of Chord
    PTP(1, z) = LC(1, z);
    %Angulo de inclinacion
    PTP(2, z) = theta(1, z);
    %Espesor
    PTP(3, z) = Thickness(1, z);
    %Area de la seccion transversal
    PTP(4, z) = nansum(Data(:, 3+(8*(z-1))), 1);
    %Modulo Elastico
    PTP(5, z) = E;
    %Modulo Elastico x Area
    PTP(6, z) = PTP(4, z) * PTP(5, z);
    %Coordenada XE del Centro Elastico
    PTP(7, z) = nansum(Data(:, 5+(8*(z-1))), 1) / PTP(6, z);
    %Coordenada YE del Centro Elastico
    PTP(8, z) = nansum(Data(:, 4+(8*(z-1))), 1) / PTP(6, z);
    %Rigidez en EIX'

```

```

    PTP(9,z) = nansum(Data(:,6+(8*(z-1))),1) -
    PTP(8,z)^2*PTP(6,z);
    %Rigidez en EIY'
    PTP(10,z) = nansum(Data(:,7+(8*(z-1))),1) -
    PTP(7,z)^2*PTP(6,z);
    %Rigidez Torsional EDXY'
    PTP(11,z) = nansum(Data(:,8+(8*(z-1))),1) -
    (PTP(8,z)*PTP(7,z)*PTP(6,z));
    %Angulo de Giro
    PTP(12,z) = rad2deg(atan(2*PTP(11,z)/(PTP(10,z) -
    PTP(9,z))))*0.5;
    %Rigidez en eje Principal 1
    PTP(13,z) = PTP(9,z) -
    PTP(11,z)*tan(deg2rad(PTP(12,z)));
    %Rigidez en Eje Principal 2
    PTP(14,z) =
    PTP(10,z)+PTP(11,z)*tan(deg2rad(PTP(12,z)));

end

% %LOAD ON AIRFOIL
% %Fuerzas, aceleraciones y masa

Radio_2=[xlsread('Perfiles.xlsx','Loads','B15:B36'),'0];
py_x=[xlsread('Perfiles.xlsx','Loads','D15:D36'),'0];
pz_x=[xlsread('Perfiles.xlsx','Loads','E15:E36'),'0];
%Torque y Momentos
Loads = zeros(P+1,6);

for h=P:-1:2
    %Momento respect with z using Load per lenght
    Loads(h-1,1)=Loads(h,1)+0.5*(pz_x(1,h-
    1)+pz_x(1,h))*(Radio(1,h)-Radio(1,h-1));
    %Moment respect with y using Load per lenght
    Loads(h-1,2)=Loads(h,2)+0.5*(py_x(1,h-
    1)+py_x(1,h))*(Radio(1,h)-Radio(1,h-1));
    %Momento con respecto a Z
    Loads(h-1,3)=Loads(h,3)-Loads(h,2)*((Radio(1,h)-
    Radio(1,h-1))-(1/6*py_x(1,h-
    1)+1/3*py_x(1,h))*(Radio(1,h)-Radio(1,h-1))^2);
    %Momento con respecto a Y

```

```

    Loads(h-1,4)=Loads(h,4)-Loads(h,1)*((Radio(1,h)-
Radio(1,h-1)))-(1/6*pz_x(1,h-
1)+1/3*pz_x(1,h))*((Radio(1,h)-Radio(1,h-1))^2);
    %Momento Flector 1
    Loads(h,5)=(Loads(h,4)*cos(deg2rad(PTP(12,h)))-
Loads(h,3)*sin(deg2rad(PTP(12,h))));
    %Momento Flector 2
    Loads(h,6)=
Loads(h,4)*sin(deg2rad(PTP(12,h)))+Loads(h,3)*cos(deg2ra
d(PTP(12,h)));
end

%Stresses
%Centrifugal Stress
N = zeros(1,P);
for z=P:-1:2
    N(1,z-1)= N(1,z)-(((PTP(4,z)+PTP(4,z-1))/2*(Radio(1,z)-
Radio(1,z-1)))*ro*w_o^2*(Radio(1,z)));
    NA_E(1,z)=abs(N(1,z))/(PTP(4,z)*E);
    NA_E(1,1)=abs(N(1,1))/(PTP(4,1)*E);
end
%Moment Stresses
Stresses = zeros(numberNodes,1*P);
Deformacion = zeros(numberNodes,1*P);
Ntheta=zeros(numberNodes,1*P);
Ltheta=zeros(numberNodes,1*P);
L=zeros(numberNodes,1*P);
Xel=zeros(numberNodes,1*P);
Yel=zeros(numberNodes,1*P);
Z=zeros(numberNodes,1*P);
for w=3:1:P
    for q=1:1:numberNodes
        L(q,w)=sqrt((Data(q,2+(8*(w-1)))-
PTP(8,w))^2+(Data(q,1+(8*(w-1)))-PTP(7,w))^2);
        %Ltheta(q,w)=(atan((Data(q,2+(8*(w-1)))-
PTP(8,w))/(Data(q,1+(8*(w-1)))-PTP(7,w))));
        Z(q,w)=complex(Data(q,1+(8*(w-1)))-
PTP(7,w),Data(q,2+(8*(w-1)))-PTP(8,w));
        Zangle=angle(Z(q,w));
        Ntheta(q,w)=(deg2rad(PTP(12,w))-Zangle);
        Xel(q,w)=L(q,w)*cos(Ntheta(q,w));
        Yel(q,w)=L(q,w)*sin(Ntheta(q,w));
    end
end

```

```

    Deformacion(q,w) =
    ((Loads(w,5))/PTP(13,w)*Yel(q,w))-
    ((Loads(w,6))/PTP(14,w)*Xel(q,w))+NA_E(1,w);
    %Deformacion(q,w) =
    (Loads(w,5)/PTP(13,w)*(Data(q,2+(8*(w-1)))-PTP(8,w)))-
    (Loads(w,6)/PTP(14,w)*(Data(q,1+(8*(w-1)))-PTP(7,w)));
    Stresses(q,w)= Deformacion(q,w)*PTP(5,w);
    end
    STMm(1,w)=max(Stresses(:,w));
    STMm(2,w)=min(Stresses(:,w));
end

%Deflexion de Viga
k1=zeros(1,P);
k2=zeros(1,P);
kz=zeros(1,P);
ky=zeros(1,P);
wy=zeros(1,P);
wz=zeros(1,P);
uy=zeros(1,P);
uz=zeros(1,P);
for j=1:1:P
    k1(1,j)=Loads(j,5)/PTP(13,j);
    k2(1,j)=Loads(j,6)/PTP(14,j);
    kz(1,j)=-
k1(1,j)*sin(deg2rad(PTP(12,j)))+k2(1,j)*cos(deg2rad(PTP(
12,j)));

ky(1,j)=k1(1,j)*cos(deg2rad(PTP(12,j)))+k2(1,j)*sin(deg2
rad(PTP(12,j)));
    end
    for v=2:1:P
        wy(1,v)=wy(1,v-1)+0.5*(ky(1,v)+ky(1,v-1))*(Radio(1,v)-
Radio(1,v-1));
        wz(1,v)=wz(1,v-1)+0.5*(kz(1,v)+kz(1,v-1))*(Radio(1,v)-
Radio(1,v-1));
        uy(1,v)=uy(1,v-1)+wz(1,v-1)*(Radio(1,v)-Radio(1,v-
1))+1/6*kz(1,v)+1/3*kz(1,v-1))*(Radio(1,v)-Radio(1,v-
1))^2;
        uz(1,v)=uz(1,v-1)-wy(1,v-1)*(Radio(1,v)-Radio(1,v-1))-
(1/6*ky(1,v)+1/3*ky(1,v-1))*(Radio(1,v)-Radio(1,v-1))^2;
    end

```

```
Xs=zeros (numberNodes, P) ;
Ys=zeros (numberNodes, P) ;
Zs=zeros (numberNodes, P) ;
STs=zeros (numberNodes, P) ;
for n=1:1:P
for q=1:numberNodes
    Xs (q, n)=Radio (q, n) ;
    Ys (q, n)=Data (q, 2+(8*(n-1))) ;
    Zs (q, n)=-Data (q, 1+(8*(n-1))) ;
    STs (q, 2)=Stresses (q, 3) ;
    STs (q, 1)=Stresses (q, 3) ;
    STs (q, n)=Stresses (q, n) ;
end
end
```