



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



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

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

**Diseño Mecánico y Ciencias de los Materiales en Ingeniería**

**PROPUESTA DE ENSAYOS ESTRUCTURALES DE  
ASPAS DE TURBINA DE VIENTO DE BAJA  
CAPACIDAD DE DOBLE RAÍZ CON BASE A LA  
NORMA IEC 61400-2**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE  
LA INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA**

**Ing. Adrian Santibañez Maldonado**

**ASESORES**

**Dr. Víctor López Garza**

**Dr. Juan Felipe Soriano Peña**

Morelia, Michoacán, octubre del 2021.

## **Dedicatorias**

“¿Cuándo crees que muere un hombre? ¿Cuándo es atravesado por una bala? No. ¿Cuándo sufre una enfermedad? No. ¿Cuándo se come una sopa hecha de hongos venenosos? No. ¡Un hombre muere cuando es olvidado!”

Dedico este trabajo de investigación a mis hijos Emmanuel, Samuel y Mellorine por inspirarme a superarme cada vez más y siempre dar lo mejor de mí.

A mis padres Manuel Santibañez y Yolanda Maldonado por siempre brindarme su apoyo incondicional.

## **Agradecimientos**

Agradezco a toda mi familia por el apoyo brindado durante este tiempo ya que sin ellos no habría sido posible.

A mi asesor, el Dr. Víctor López Garza por aceptarme para trabajar en sus proyectos de energías renovables, así mismo agradezco todo el conocimiento y herramientas que me brindó y sobre todo por tenerme tanta paciencia estos 2 años. Agradezco al Dr. Juan Felipe Soriano Peña por todos los conocimientos compartidos y por estar siempre dispuesto a brindarme su apoyo.

Al CONACYT por la beca brindada para que este proyecto de investigación se pudiera hacer realidad.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, de donde soy orgullosamente egresado.

A todo el personal de Nesting CNC S.A de C.V por la ayuda brindada durante las pruebas de laboratorio y al ingeniero José de Jesús Padilla Gómez por dejarme hacer uso de sus instalaciones.

A mi amiga Pau por alentarme a seguir preparándome en este mundo tan hermoso de la ingeniería.

A mis compañeros Poare, Andrés, Fer, David, Diego, Maritza y Neri por hacer de estos 2 años más amenos.

## Resumen

La industria de la energía eólica cada año se supera respecto al anterior en unidades instaladas. Las zonas de mayor velocidad de viento han sido explotadas en su totalidad, ahora la atención se está centrando en las zonas de media y baja velocidad de viento, especialmente estas últimas ya que es el recurso que más abunda. Para ello es necesario desarrollar nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento eficiente del recurso de baja potencia. Debido a que es un campo apenas en desarrollo, las normativas que certifican la vida útil de los componentes de aerogeneradores de baja potencia son muy escasas.

Este trabajo de investigación tiene como principal objetivo desarrollar una metodología de ensayos estructurales para álabes de doble raíz, que es una invención de los investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo para aprovechar las zonas de bajas velocidades de viento. Dicha metodología está estrictamente apegada a los estándares que dicta la norma IEC 61400-2 para aerogeneradores de baja potencia.

Para ello el álabe de doble raíz se simulará mediante elemento finito para distintas hipótesis de carga que dicta la norma, así como también ensayos estáticos utilizando técnicas de extensometría. Por último, se analizarán y compararán los datos obtenidos para proponer una metodología específica para este tipo de álabes.

Palabras clave: **extensometría, simulación numérica, energía eólica, pruebas estáticas, álabes.**

## **Abstract**

The wind energy industry each year exceeds the previous one in installed units. The areas with the highest wind speeds have been exploited in their entirety, now the attention is focusing on the areas of medium and low wind speed, especially the latter since it is the most abundant resource. For this, it is necessary to develop new technologies that allow efficient use of the low-power resource. Due to the fact that it is a barely developing field, the regulations that certify the useful life of the components of low-power wind turbines are very scarce.

The main objective of this research work is to develop a methodology for structural tests for double root blades, which is an invention of the researchers at the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo to take advantage of the areas of low wind speeds. This methodology is strictly adhered to the standards dictated by the IEC 61400-2 standard for low power wind turbines.

For this, the double root blade will be simulated by means of a finite element for different load hypotheses dictated by the standard, as well as static tests using extensometric techniques. Finally, the data obtained will be analyzed and compared to propose a specific methodology for this type of blades.

## Contenido

Dedicatorias.....	I
Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Abstract.....	IV
Nomenclatura.....	XV
<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>1</b>
<b>Antecedentes y estado actual del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>Estado del arte.....</b>	<b>4</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>6</b>
<b>Hipótesis.....</b>	<b>7</b>
<b>Objetivo general.....</b>	<b>7</b>
<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>7</b>
<b>Metodología del proyecto de investigación.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN: CARACTERÍSTICAS Y RECURSOS DEL VIENTO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>13</b>
1.2 Características generales del recurso eólico.....	13
<b>1.2.1 Recurso eólico: orígenes globales.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.2 Características espaciales y temporales del viento.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.3 Estimación del potencial del recurso eólico.....</b>	<b>19</b>
1.3 Características de la capa límite atmosférica.....	21
<b>1.3.1 Densidad y presión atmosférica.....</b>	<b>22</b>
<b>1.3.2 Estabilidad de la capa límite atmosférica.....</b>	<b>22</b>
<b>1.3.3 Turbulencia.....</b>	<b>23</b>
<b>1.3.4 El viento constante: variación de la velocidad del viento con la altura.....</b>	<b>27</b>
<b>1.3.5 Efecto del terreno en las características del viento.....</b>	<b>30</b>
1.4 Análisis de datos de viento y estimación de recurso eólico.....	31
<b>1.4.1 Aspectos generales de la producción de energía de turbinas eólicas.....</b>	<b>31</b>
<b>1.4.2 Métodos directos de análisis de datos, caracterización de recursos, y productividad de la turbina.....</b>	<b>32</b>
<b>1.4.3 Análisis estadístico de datos de viento.....</b>	<b>36</b>
<b>1.4.4 Velocidades extremas de viento.....</b>	<b>39</b>

1.5 Estimaciones de producción de energía de turbinas eólicas usando técnicas estadísticas.....	39
1.6 Aerodinámica de las turbinas de viento .....	41
<b>1.6.1 Introducción</b> .....	41
<b>1.6.2 Teoría de momento y límite de Betz</b> .....	41
CAPÍTULO II. NORMA IEC-61400-2.....	46
2.1 Norma IEC 61400-2: diseño estructural.....	46
<b>2.1.1 Generalidades</b> .....	46
<b>2.1.2 Metodología del diseño</b> .....	46
<b>2.1.3 Cargas e hipótesis de cargas</b> .....	46
<b>2.1.4 Metodología de cargas simplificadas</b> .....	49
<b>2.1.5 Calculo de las hipótesis de carga a aplicar</b> .....	51
Capítulo III. SIMULACIÓN DE LAS HIPÓTESIS DE CARGA EN ASPA DE DOBLE RAÍZ	53
3.1 Elemento finito: teoría general.....	53
3.2 Composición de materiales del aspa.....	53
3.3 Criterios de fallo en materiales compuestos.....	56
3.4 Simulación en Elemento Finito del modelo aeroelástico .....	58
3.5 Mallado y condiciones de frontera .....	60
<b>3.5.1 Criterios de calidad de malla</b> .....	62
<b>3.5.2 Convergencia de mallado</b> .....	63
<b>3.5.3 Hipótesis A</b> .....	65
<b>3.5.4 Hipótesis E</b> .....	66
<b>3.5.5 Hipótesis H</b> .....	67
3.6 RESULTADOS .....	67
<b>3.6.1 Hipótesis A: operación normal</b> .....	69
<b>3.6.2 Hipótesis E: velocidad máxima del rotor</b> .....	83
<b>3.6.3 Hipótesis H: carga extrema del viento</b> .....	87
CAPITULO IV. ENSAYOS ESTRUCTURALES EN ASPA DE DOBLE RAIZ.....	93
4.1 Extensometría .....	93
<b>4.1.1 Selección de una galga extensométrica</b> .....	94
<b>4.1.2 Parámetros de una galga</b> .....	94
<b>4.1.3 Tipos de aleaciones para galgas</b> .....	94
<b>4.1.4 Materiales de soporte</b> .....	95

4.2 Propuesta de instalación de galgas extensométricas.....	95
<b>4.2.1 Propuesta para hipótesis A</b> .....	97
<b>4.2.2 Propuesta para la hipótesis de carga H</b> .....	100
4.3 Instalación de galgas en aspa de doble raíz .....	104
<b>4.3.1 Pegado de galgas</b> .....	104
<b>4.3.2 Soldado de galgas</b> .....	109
4.4 Experimentación .....	111
<b>4.4.1 Metodología</b> .....	111
<b>4.4.2 Pruebas de laboratorio</b> .....	112
<b>4.4.3 Resultados</b> .....	117
<b>4.4.4 Conclusiones</b> .....	120
Capítulo V. Análisis de resultados .....	122
5.1 Comparación de resultados obtenidos en la simulación y las mediciones.....	122
Conclusiones.....	125
BIBLIOGRAFÍA.....	127
ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN Y PARTICIPACIÓN .....	130
ANEXOS .....	132
Anexo A Curso para pegado de galgas extensométricas en aspas de turbinas.....	132
Anexo B Parámetros para el cálculo de las hipótesis de carga.....	142
Anexo C Ficha técnica de la resina Epoxi .....	144

## Índice de imágenes

Imagen 1.- Pronóstico de capacidad instalada en el mercado mundial 2009-2020. [2] .....	3
Imagen 2.- Diagrama de la metodología general. [11] .....	9
Imagen 3.- Diagrama del plan experimental. [11].....	11
Imagen 4.- Partes del banco de pruebas estáticas y de fatiga. [12] .....	12
Imagen 5.- Ilustración del viento geostrófico; $F_p$ = fuerza de presión de aire, y $F_c$ =fuerza de Coriolis. [13] .....	15
Imagen 6.- Ilustración del gradiente del viento $U_{gr}$ ; R es el radio de curvatura. [13] .....	16
Imagen 7.- Flujo de aire a través del rotor de una turbina; U es la velocidad del viento y A es el área. [13].....	19
Imagen 8.- Intensidad de turbulencia para diferentes estándares. [14].....	24
Imagen 9.- Probabilidad Gaussiana de la función de densidad y un histograma de datos del viento. [13] .....	25
Imagen 10.- Perfil de velocidad experimental (van der Tempel, 2006). [13] .....	27
Imagen 11.- Determinación de un terreno plano. [13] .....	31
Imagen 12.- Curva de salida de potencia de una turbina eólica. [13].....	32
Imagen 13.- Histograma típico. [13] .....	34
Imagen 14.- Ejemplo de curvas de duración de velocidad para distintas partes del mundo. [13] .....	35
Imagen 15.- Ejemplo de la función de densidad de probabilidad de Rayleigh. [13] .....	38
Imagen 16.- Ejemplo de la función de densidad de probabilidad de Weibull. [13].	39
Imagen 17.- Variación del $C_p$ con la velocidad de punta del aspa para una turbina Vestas V80. [15].....	41
Imagen 18.- Modelo del disco actuador de una turbina de viento; U, es la velocidad del viento; 1, 2, 3 y 4 son ubicaciones. [13].....	42
Imagen 19.- Aspa de doble raíz. ....	54
Imagen 20.- Lámina reforzada unidireccional con ejes locales x-y-z y ejes globales 1-2-6. [21].....	55
Imagen 21.- Esquema de la composición de un laminado. [21] .....	56
Imagen 22.- Distribución de las láminas de fibra de vidrio/epoxi en álabe de doble raíz. [4] .....	60

Imagen 23.- Mallado del aspa. ....	61
Imagen 24.- Fuerza centrífuga. ....	65
Imagen 25.- Momento flector Flapwise. ....	66
Imagen 26.- Momento flector Edgewise. ....	66
Imagen 27.- Fuerza centrífuga máxima.....	67
Imagen 28.- Momento flector Edgewise. ....	67
Imagen 29.- Deformación total. ....	69
Imagen 30.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz. ....	70
Imagen 31.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz. ....	70
Imagen 32.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.....	71
Imagen 33.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.....	72
Imagen 34.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta. ....	72
Imagen 35.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta. ....	73
Imagen 36.- Tsai-Wu máximo en zona media. ....	73
Imagen 37.- Deformación total. ....	74
Imagen 38.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz. ....	74
Imagen 39.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz. ....	75
Imagen 40.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.....	76
Imagen 41.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.....	76
Imagen 42.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta. ....	77
Imagen 43.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta. ....	78
Imagen 44.- Tsai-Wu máximo en la raíz.....	78
Imagen 45.- Deformación total. ....	79
Imagen 46.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz. ....	79
Imagen 47.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz. ....	80
Imagen 48.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.....	80
Imagen 49.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.....	81
Imagen 50.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta. ....	81
Imagen 51.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta. ....	82
Imagen 52.- Tsai-Wu máximo en la raíz.....	82
Imagen 53.- Deformación máxima. ....	83
Imagen 54.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz. ....	83

Imagen 55.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz. ....	84
Imagen 56.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.....	85
Imagen 57.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.....	85
Imagen 58.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta. ....	86
Imagen 59.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta. ....	86
Imagen 60.- Tsai-Wu máximo en zona media. ....	87
Imagen 61.- Deformación total. ....	87
Imagen 62.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz. ....	88
Imagen 63.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz. ....	89
Imagen 64.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.....	89
Imagen 65.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.....	90
Imagen 66.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta. ....	90
Imagen 67.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta. ....	91
Imagen 68.- Tsai-Wu máximo en raíz. ....	91
Imagen 69.- Galga extensométrica y sus partes principales. ....	93
Imagen 70.- Indicador de tensión y registrador. ....	96
Imagen 71.- Tipos de configuración del puente de Wheatstone. [26].....	97
Imagen 72.- Hipótesis de carga A: Edgewise.....	97
Imagen 73.- Microdeformaciones para hipótesis de carga A: Edgewise.....	98
Imagen 74.- Hipótesis de carga A: Flapwise. ....	98
Imagen 75.- Microdeformaciones para hipótesis de carga A: Flapwise. ....	99
Imagen 76.- Ubicación de galga cerca de raíz. ....	99
Imagen 77.- Ubicación de las galgas en la segunda raíz, intradós y extradós. ...	100
Imagen 78.- Galga en el intradós de la raíz principal. ....	100
Imagen 79.- Hipótesis de carga H. ....	101
Imagen 80.- Microdeformaciones para hipótesis de carga H. ....	101
Imagen 81.- Galga en el intradós de la raíz principal. ....	102
Imagen 82.- Galga en el extradós de la segunda raíz. ....	102
Imagen 83.- Galgas en el intradós de la raíz principal. ....	103
Imagen 84.- Galgas para pendiente. ....	103
Imagen 85.- Gasas secas para limpieza. ....	104
Imagen 86.- Acondicionador A. ....	105

Imagen 87.- Marcación de ejes en la superficie a aplicar la galga. ....	105
Imagen 88.- Neutralizador 5A.....	106
Imagen 89.- Superficie lijada lista para instalar la galga extensométrica. ....	106
Imagen 90.- Galga en superficie esterilizada. ....	107
Imagen 91.- Galga posicionada.....	107
Imagen 92.- Colocación del catalizador. ....	108
Imagen 93.- Colocación del adhesivo. ....	108
Imagen 94.- Colocación de los puntos de soldadura en la galga. ....	109
Imagen 95.- Preparación de los cables. ....	110
Imagen 96.- Puntas soldadas a terminales de la galga.....	110
Imagen 97.- Doblez de seguridad. ....	111
Imagen 98.- Metodología del experimento. ....	112
Imagen 99.- Ubicación de las galgas para el modo Flapwise ....	113
Imagen 100.- Ubicación de las galgas para el modo Edgewise. ....	114
Imagen 101.- Carga colocada para la Hipótesis A: Flapwise. ....	116
Imagen 102.- Sensado de variables.....	116
Imagen 103.- Lectura y registro de las microdeformaciones.....	117
Imagen 104.- Kit básico de aplicación básico Tipo SAK-2. ....	132
Imagen 105.- Limpieza de la superficie.....	134
Imagen 106.- Aplicación del acondicionador 5A a la superficie.....	135
Imagen 107.- Trazado de ejes.....	135
Imagen 108.- Aplicado del neutralizador 5A a la superficie.....	135
Imagen 109.- Lijado de superficie. ....	136
Imagen 110.- Esterilización de pinzas y manipulación de galga. ....	136
Imagen 111.- Esterilización de cristal para manipulación de galga. ....	137
Imagen 112.- Cinta PCT-2M para transporte de galga.....	137
Imagen 113.- Ubicación de galga en zona a pegar.....	138
Imagen 114.- Aplicación del catalizador.....	138
Imagen 115.- Aplicación del adhesivo sobre la galga. ....	139
Imagen 116.- Retirado de la cinta. ....	139
Imagen 117.- Colocación de los puntos de soldadura a la galga. ....	140
Imagen 118.- Preparación de los cables. ....	140

Imagen 119.- Puntas soldadas a terminales de la galga.....	141
Imagen 120.- Doble de seguridad. ....	141

## Índice de tablas

Tabla 1. Hipótesis de carga de diseño para el método de cálculo de cargas simplificadas. [16].....	49
Tabla 2. Relación entre los coeficientes de Tsai-Wu y las resistencias a fallo. [21] .....	57
Tabla 3. Propiedades de los materiales de las láminas de fibra de vidrio/epoxi. [22] .....	59
Tabla 4. Resumen de las condiciones de carga.....	61
Tabla 5.- Espectro de calidad de los parámetros de malla. [23].....	63
Tabla 6. Características del mallado. ....	63
Tabla 7. Análisis de convergencia de malla. ....	64
Tabla 8.- Posición y ubicación de las galgas para el modo Flapwise. ....	113
Tabla 9.- Resumen de las condiciones y variables a sensor, para la Hipótesis A: Flapwise. ....	113
Tabla 10.- Posición y ubicación de las galgas para el modo Edgewise. ....	114
Tabla 11.- Resumen de las condiciones y variables a sensor, para la Hipótesis A: Edgewise.....	114
Tabla 12.- Resumen de las condiciones y variables a sensor, para la Hipótesis H: Edgewise.....	115
Tabla 13.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones. ....	117
Tabla 14.- Resultados para el día 2, se realizaron 14 mediciones. ....	118
Tabla 15.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones. ....	118
Tabla 16.- Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones. ....	119
Tabla 17.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones. ....	119
Tabla 18.- Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones. ....	120

## Índice de gráficas

Gráfica 1.- Gráfica de convergencia de mallado. ....	65
Gráfica 2.- Distribución de esfuerzos según la teoría de falla de Von-Misses, por lámina y región para cada una de las hipótesis de carga, intrados del álabe. ....	68
Gráfica 3.- Distribución de esfuerzos según la teoría de falla de Von-Misses, por lámina y región para cada una de las hipótesis de carga, extradós del álabe. ....	69
Gráfica 4.- Influencia de la temperatura ambiental en las mediciones. ....	120
Gráfica 5.- Influencia de la humedad en las mediciones. ....	121
Gráfica 6.- Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y experimentación para la hipótesis A: Flapwise.....	122
Gráfica 7.- Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y experimentación para la hipótesis A: Edgewise. ....	123
Gráfica 8.- Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y experimentación para la hipótesis H: Edgewise. ....	124

## Nomenclatura

$A$ =área de rotor ( $m^2$ )

$A_{proj,B}$  = Área del álabe proyectada ( $m^2$ )

$B$ =número de palas (-)

$C_d$ =coeficiente de resistencia (-)

$f$ =parámetro de fuerza de Coriolis (-)

$F_c$ =fuerza de Coriolis ( $m/s^2$ )

$F_p$ =fuerza de presión del aire ( $kg/m^2$ )

$F_{zB}$  =fuerza sobre la pala en la raíz en la dirección de la envergadura (N)

$g$  =aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$IT$ =intensidad de turbulencia (-)

$K_e$ =factor de patrón de energía (-)

$m_B$  =masa de la pala (kg)

$M_{xB}$  =momento flector en la raíz de la pala en la dirección x ( $N*m$ )

$M_{yB}$  = momento flector en la raíz de la pala en la dirección y ( $N*m$ )

$N$ =horas del año (8760)

$Q_{design}$  =par del eje de diseño ( $N*m$ )

$R$ =constante ideal de los gases ( $N*m/kg*K$ )

$R$  = radio del rotor (m)

$R_{cog}$  =distancia radial entre el centro de gravedad de la pala y el centro del rotor (m)

$T$ =temperatura absoluta (K)

$\bar{U}$ =velocidad anual de viento (m/s)

$U$ =velocidad de viento (m/s)

$U_g$ =viento geostrófico (m/s)

$U_{gr}$ =gradiente del viento (m/s)

$U_i$ =la velocidad anual en promedio por hora (m/s)

$V_{e50}$  = valor extremo de la velocidad en 50 años (m/s)

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

$\sigma_u$ =desviación estándar

$\lambda_{\text{design}}$  =relación de velocidad en la punta de la pala (-)

$\Omega_{n,\text{design}}$ =velocidad de rotación del rotor (rad/s)

$\Omega_{n,\text{máx}}$ =velocidad de rotación máxima del rotor (rad/s)

$\Phi$ =latitud

## Planteamiento del problema

Las normas para aerogeneradores surgen por la necesidad de tener una metodología a la hora de diseñar, construir y poner en marcha turbinas eólicas para la generación de energía eléctrica. Estas normas establecen una metodología a seguir para el ensayo de las aspas antes del montaje en el rotor y así garantizar el correcto funcionamiento.

Las normas establecen un criterio para clasificar a los aerogeneradores en 3 tipos de acuerdo a su potencia, estos son baja, media y alta. En el presente trabajo nos centraremos específicamente en las de baja potencia ( $\leq 50 \text{ Kw}$ ).

Las normas para aerogeneradores pequeños (AP) son muy escasas y por lo general vienen como apartados especiales dentro de las normas de alta y media potencia. Una de las normas para AP es la norma IEC 61400-2.

En dicha norma específica la metodología de cargas simplificadas, así como de modelación de aspas para AP, esto con la finalidad de garantizar su calidad y buen funcionamiento. La deficiencia de la norma radica en que aún no propone una metodología para aspas de doble raíz, las cuales estudiaremos en este trabajo, el cual tiene como intención proponer una metodología de cargas para el ensayo de aspas de doble raíz, esto con base en los criterios que establece la norma IEC 61400-2.

## **Antecedentes y estado actual del problema**

A pesar de la pandemia que estamos atravesando, 2020 fue el mejor año de la historia para la industria de energía eólica con 93 GW de unidades nuevas instaladas, esto representa un incremento interanual del 53%. Con estos 93 GW instalados en 2020, la energía eólica instalada total asciende a 743 GW a nivel global. [1]

A través de las innovaciones tecnológicas, el mercado mundial de energía eólica casi se ha cuadruplicado en tamaño durante la última década y se ha establecido como una de las fuentes de energía más competitivas en costos en todo el mundo. En 2020, el crecimiento récord fue impulsado por un aumento de las instalaciones en China y los EE. UU., los dos mercados de energía eólica más grandes del mundo, que en conjunto instalaron casi el 75% de las nuevas instalaciones en 2020 y representan más de la mitad de la energía eólica total del mundo. capacidad. [1]

En cuanto al mercado de baja potencia de refiere, el Small Wind Report 2017 de la World Wind Energy Association, pronostica una tasa de crecimiento anual mínima para el mercado de baja potencia de un 12%. Pronostica también una adición anual de nueva capacidad instalada de baja potencia para 2020, de 270 MW y un total acumulativo instalado de 1.9 GW para 2020. [2]

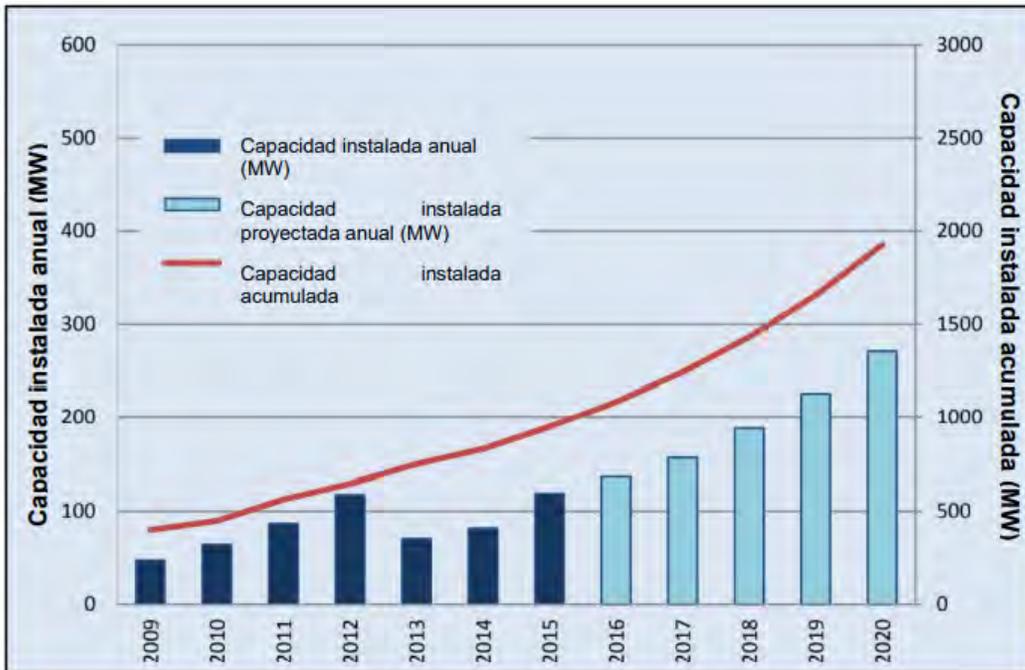


Imagen 1.- Pronóstico de capacidad instalada en el mercado mundial 2009-2020.

[2]

## **Estado del arte.**

López Garza Víctor, Hernández Arriaga Isaac, Navarro Rojero María Guadalupe y Lozano Mandujano David, realizaron el diseño aerodinámico y el análisis estructural de un álabe de doble raíz fabricado con materiales compuestos para una turbina eólica de 3 KW. El álabe se simuló por medio de software de elemento finito empleando la metodología de carga simplificada de la norma IEC 61400-2. Concluyeron que este tipo de álabes presentan un incremento en la potencia, sin embargo, los momentos se incrementan significativamente en operación normal, por lo que es necesario ampliar los análisis estructurales para lograr una optimización. [3]

López Garza Víctor, desarrolló una metodología de diseño y manufactura de álabes de turbina de viento de baja capacidad de doble raíz, así como de las conchas y los moldes maestros. Concluyendo que estos álabes, según el estudio realizado en software de elemento finito, puede incrementar hasta en un 20% la potencia de una turbina eólica con este tipo de álabes, en comparación de una turbina con álabes de una raíz. [4]

Molinero Hernández Daniel, realizó simulaciones mediante software CFD para reducir la estela formada debida a la turbulencia en turbinas de baja potencia y, además construyó un banco de pruebas para la medición de la potencia y las RPM de una microturbina. Concluyendo que la estela se puede reducir modificando la geometría de los álabes. [5]

Casillas Farfán Christian Erik, realizó pruebas empleando software CFD para optimizar el torque y la velocidad de arranque en turbinas horizontales de baja potencia. Concluyó que se puede lograr un torque y velocidades mayores modificando la geometría de los álabes. [6]

Abolfazl Pourrajabian, Peyman Amir Nazmi Afshar, Mehdi Ahmadizadeh y David Wood, realizaron una metodología de ensayos estructurales en aspas huecas de turbinas de baja potencia, esto con la intención de reducir el tiempo de arranque y

el esfuerzo generado en el aspa de la turbina. Los resultados mostraron que un perfil hueco acelera el arranque a bajas velocidades disminuyendo la inercia del aspa mientras que el esfuerzo generado a lo largo de la cuchilla no excede el esfuerzo permisible. [7]

Wu J. H. y Lai F. M., realizaron un análisis de la vida útil de álabes tipo sándwich compuesto para aerogeneradores de baja potencia utilizando la norma IEC 61400-2. Concluyendo que la norma también es válida para los álabes de materiales compuestos y proporcionan una base de datos para los diferentes materiales. [8]

Marín Tellez Paulina, realizó simulaciones numéricas y mediciones extensométricas en un aspa de 600 W. Utilizó un perfil NACA 4412 aplicando las siguientes hipótesis de carga: operación normal, empuje máximo, inmovilización con carga del viento y exposición máxima. Al comparar los datos de la simulación y las mediciones extensométricas, concluyó que el análisis por elementos finitos es un paso clave a la hora de ahorrar recursos y además otorga parámetros importantes a la hora de manufacturar y realizar las pruebas extensométricas. [9]

L. Menegozzo et al. realizaron un estudio numérico con el motivo de analizar un evento de ráfaga extrema de viento en base a la norma IEC 61400-2 en una turbina de eje horizontal. Para ello utilizaron el software ANSYS Fluent con una malla móvil no estructurada y colocando la ráfaga extrema como condición de entrada, tanto para la turbina en operación como en estado estacionario. Llegaron a la conclusión de que el análisis mediante CFD es una herramienta confiable para el análisis de turbinas eólicas. [10]

## **Justificación**

Una de las principales limitantes a la hora de diseñar nuevas aspas de AP radica en que las normas están limitadas en cuanto a la metodología de ensayos para aspas de una raíz, esto ocasiona que los diseñadores no tengan una metodología bien definida de cómo garantizar que sus diseños podrán soportar las condiciones de trabajo de las aspas de doble raíz.

El presente trabajo busca proponer una metodología de ensayos estructurales para aspas de doble raíz en turbinas de baja potencia, esto en base a la norma IEC 61400-2.

## **Hipótesis**

Se puede proponer una metodología de ensayos estructurales para aspas de doble raíz de baja capacidad en base a la norma IEC 61400-2.

## **Objetivo general**

Realizar el análisis estructural a un aspa de doble raíz para una turbina de viento de baja capacidad de 2400 Watts, en base a la norma IEC 61400-2.

## **Objetivos específicos**

- 1.- Búsqueda bibliográfica y revisión del estado del arte.
- 2.- Simular mediante software de elemento finito el aspa de doble raíz bajo las cargas fijadas por la norma IEC 61400-2.
- 3.- Hacer los ensayos estructurales del aspa de doble raíz de baja capacidad en laboratorio y analizar sus resultados.
- 4.- Comparar los resultados obtenidos mediante simulación numérica con los obtenidos en laboratorio.
- 5.- Proponer una metodología de ensayos estructurales para un aspa de doble raíz de baja capacidad.

## **Metodología del proyecto de investigación**

La investigación experimental se ha ideado con el propósito de determinar con la mayor confiabilidad posible, relaciones de causa- efecto, para lo cual uno o más grupos, se exponen a estímulos experimentales y los comportamientos resultantes se comparan.

En la imagen 2 se muestra el diagrama de la metodología general a seguir para una investigación experimental de acuerdo con Monje Álvarez, la primera etapa es la revisión de la literatura cuyo fin es seleccionar la información necesaria y relevante para el tema de investigación. [11]

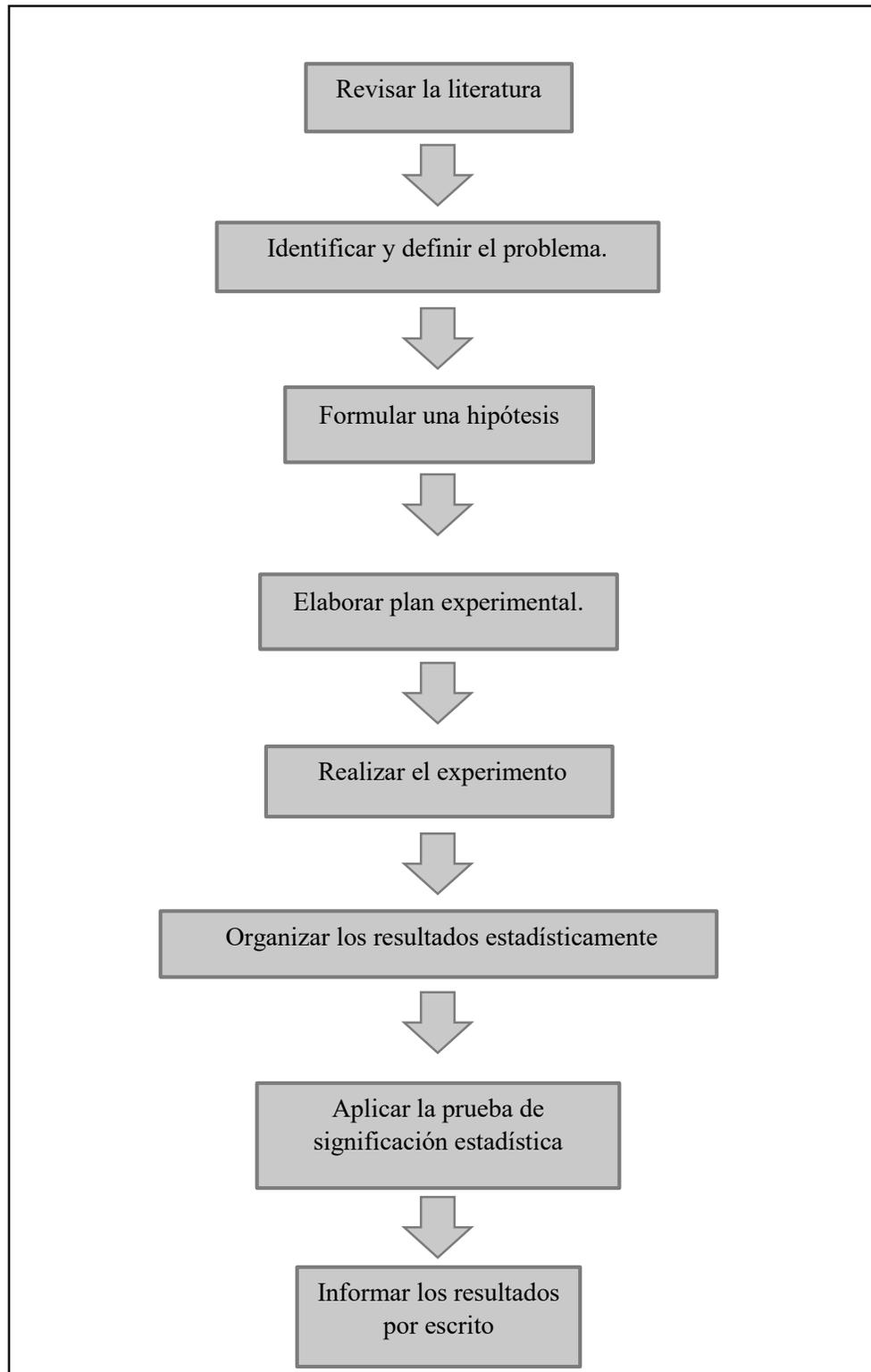


Imagen 2.- Diagrama de la metodología general. [11]

Una de las etapas más importantes es identificar y definir el problema, la función de esta etapa consiste en revelar al investigador si su proyecto de investigación es viable, dentro de sus tiempos y recursos disponibles. Al formular una hipótesis explicativa, se deben deducir las consecuencias del problema en términos observables.

Las siguientes etapas consisten en elaborar un plan experimental y realizar el experimento. En la etapa de organizar los resultados se debe hacer de forma estadísticamente apropiada, de modo que se pueda apreciar claramente el efecto. Además de aplicar la prueba de significación estadística apropiada para finalmente informar los resultados por escrito.

En la imagen 3, se muestra a detalle las etapas del plan experimental. La primera es identificar todos los factores o variables no experimentales que puedan afectar el experimento y determinar cómo controlarlas; tales como los factores ambientales, temperatura, humedad, ruido, etc.

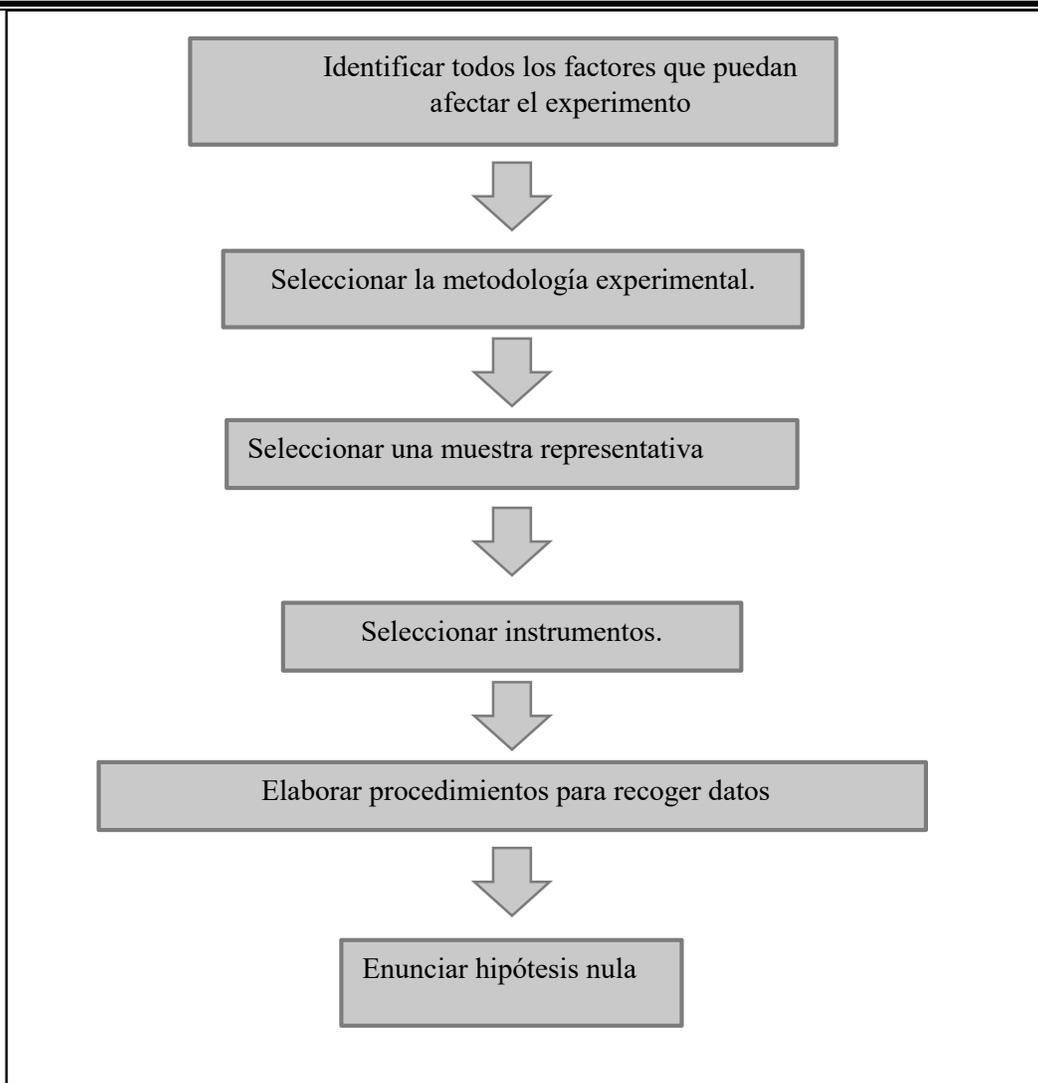


Imagen 3.- Diagrama del plan experimental. [11]

Para realizar los ensayos estructurales a los álabes se utilizará el banco de pruebas de cargas estáticas y de fatiga (Imagen 4) diseñado por el Ing. Erick Pérez Juárez [12], el cual está conformado por las siguientes partes:

1. Base
2. Cabezal- soporte
3. Cabezal- sujetador
4. Álabe
5. Sistema de fuerza [12]

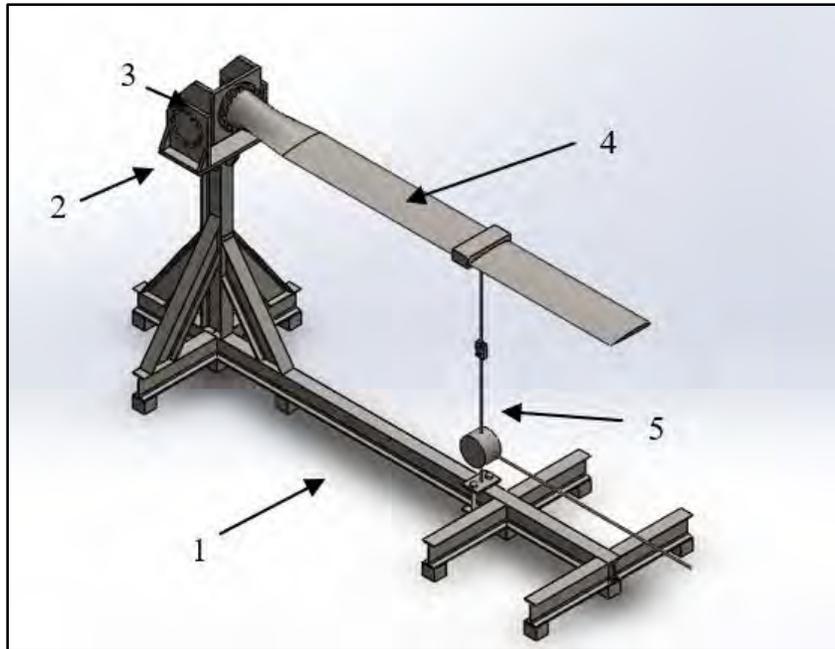


Imagen 4.- Partes del banco de pruebas estáticas y de fatiga. [12]

El álabe se monta en el cabezal y las cargas son aplicadas de forma normal al eje del álabe mediante el sistema de fuerza. El banco de pruebas se encuentra diseñado para aplicar cargas axiales en un solo punto del álabe aplicando como máximo 1054N. [12]

# **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN: CARACTERÍSTICAS Y RECURSOS DEL VIENTO**

## **1.1 Introducción**

El material cubierto en este capítulo puede ser de uso directo para otros aspectos de la energía eólica que se discuten en las otras secciones de este trabajo. Por ejemplo, el conocimiento de las características del viento en un lugar en particular es relevante para los siguientes temas:

- **Diseño de sistemas:** el diseño de sistemas requiere el conocimiento de las condiciones promedio del viento, así como también de la naturaleza turbulenta y condiciones extremas de viento.
- **Evaluación de desempeño:** requiere determinar lo esperado en productividad energética y rentabilidad de un sistema de energía eólica particular basado en el recurso eólico del lugar.
- **Ubicación:** los requisitos de ubicación pueden incluir la evaluación o predicción de los sitios candidatos para una o más turbinas eólicas.
- **Operación:** los requisitos de operación incluyen la necesidad de información de recursos eólicos que se puede usar para la gestión de carga, procedimientos operativos (como arranque y apagado), y la predicción de mantenimiento o vida del sistema. [13]

## **1.2 Características generales del recurso eólico**

Al discutir las características generales del recurso eólico, es importante considerar temas como los orígenes globales del recurso eólico, las características generales del viento, y estimaciones del potencial del recurso eólico.

### **1.2.1 Recurso eólico: orígenes globales**

#### **1.2.1.1 Patrones globales generales**

La fuente original de la energía renovable contenida en el recurso eólico en la tierra es el sol. Los vientos globales son causados por la diferencia de temperatura a lo largo de la superficie de la tierra debido al calentamiento desigual por la radiación.

Las variaciones espaciales en la transferencia de calor en la atmósfera de la tierra crean variaciones en el campo de presión atmosférica que hace que el aire se mueva de alta a baja presión. Hay una fuerza en el gradiente de presión en la dirección vertical, pero esto generalmente se cancela por la fuerza descendente de gravitación. Por lo tanto, los vientos soplan predominantemente en el plano horizontal, respondiendo a gradientes horizontales de presión. Al mismo tiempo, hay fuerzas que se esfuerzan por mezclar las diferentes temperaturas y masas de aire a presión distribuidas por la superficie de la tierra. [13]

### 1.2.1.2 Mecánica del movimiento del viento

Uno de los modelos más simples para la mecánica del movimiento del viento de la atmósfera, se pueden considerar cuatro las fuerzas atmosféricas. Estos incluyen fuerzas de presión, la fuerza de Coriolis causada por la rotación de la tierra, fuerzas de inercia debidas al movimiento circular a gran escala y fuerzas de fricción en la superficie de la tierra.

La fuerza de presión del aire (por unidad de masa),  $F_p$ , está dada por:

$$F_p = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $n$  es la dirección normal para líneas de presión constante. También,  $\partial p / \partial n$  está definido como el gradiente de presión normal a presión constante. La fuerza de Coriolis (por unidad de masa),  $F_c$ , es una fuerza ficticia causada por mediciones con respecto a un marco de referencia giratorio (la tierra), se expresa como:

$$F_c = f * U \quad (2)$$

donde  $U$  es la velocidad del viento y  $f$  es el parámetro de Coriolis [ $f=2*\omega*\text{Sen}(\Phi)$ ].  $\Phi$  representa la latitud y  $\omega$  la velocidad de rotación de la tierra. La dirección de la fuerza de Coriolis es perpendicular a la dirección de la fuerza del viento. La resultante de estas dos fuerzas, llamado viento geostrófico, tiende a ser paralelo con las isobaras (ver imagen 5). [13]

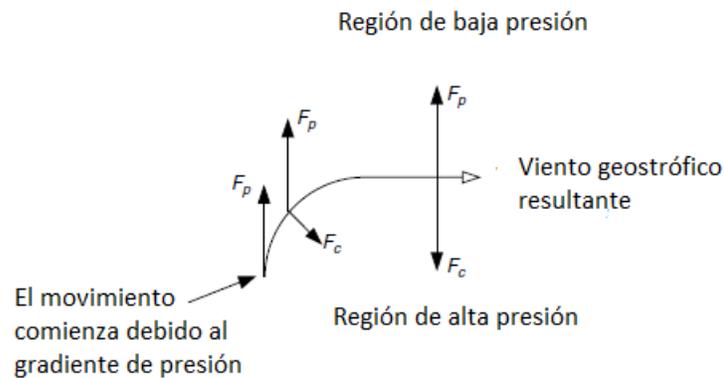


Imagen 5.- Ilustración del viento geostrófico;  $F_p$ = fuerza de presión de aire, y  $F_c$ =fuerza de Coriolis. [13]

La magnitud del viento geostrófico,  $U_g$ , es una función del balance de fuerzas:

$$U_g = \frac{-1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3)$$

Este es un caso idealizado ya que la presencia de áreas de alta y baja presión provoca isobaras curvadas. Esto impone una fuerza adicional sobre el viento, una fuerza centrífuga. La resultante del viento, llamado viento de gradiente,  $U_{gr}$ , se muestra en la imagen 6. [13]

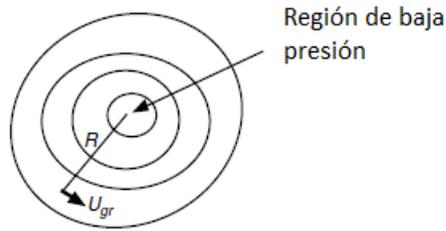


Imagen 6.- Ilustración del gradiente del viento  $U_{gr}$ ;  $R$  es el radio de curvatura. [13]

El gradiente del viento también es paralelo a las isobaras y es el resultado del equilibrio de fuerzas:

$$\frac{U_{gr}^2}{R} = -fU_{gr} \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (4)$$

donde  $R$  es el radio de curvatura de la trayectoria de las partículas de aire y sustituyendo en la ecuación (3), para  $U_g$  tenemos:

$$U_g = U_{gr} + \frac{U_{gr}^2}{fR} \quad (5)$$

### 1.2.1.3 Otros patrones de circulación atmosférica

El patrón de circulación general descrito con anterioridad representa un modelo para una suave superficie esférica. En realidad, la superficie de la tierra varía considerablemente, con grandes masas de océanos y continentes.

La circulación atmosférica a menor escala se puede dividir en circulación secundaria y terciaria. La circulación secundaria ocurre si los centros de alta o baja presión son causados por el calentamiento o enfriamiento de la atmósfera inferior. La circulación secundaria incluye lo siguiente:

- Huracanes;
- Circulación monzónica;
- Ciclones extra tropicales; [13]

La circulación terciaria es a menor escala, circulaciones locales caracterizadas por vientos locales. Estas incluyen las siguientes:

- Brisa terrestre y marina;
- Vientos de valle y montaña;
- Flujo tipo monzón;
- Vientos Foehn;
- Tormentas eléctricas;
- Tornados.

### **1.2.2 Características espaciales y temporales del viento**

El movimiento atmosférico varía con ambos, tiempo (segundos a meses) y espacio (centímetros a miles de kilómetros).

#### **1.2.2.1 Variaciones en el tiempo**

De acuerdo a las prácticas convencionales, las variaciones de la velocidad del viento en el tiempo se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Interanual: las variaciones interanuales en la velocidad del viento ocurren en escalas de tiempo mayores a 1 año. Estas tienen un gran efecto a largo plazo en la producción de la turbina eólica. Los meteorólogos generalmente concluyen que se necesitan 30 años de datos para determinar los valores a largo plazo del clima y que se necesitan al menos cinco años para llegar a un promedio confiable de velocidad anual del viento en un lugar determinado.
- Anual: las variaciones significativas en las velocidades de viento promedio estacional o mensual son comunes en la mayoría del mundo
- Diurna: tanto en las latitudes tropicales como en las templadas, también pueden producirse grandes variaciones de viento en un lugar diurno o a escala de tiempo diaria. Este tipo de variación de la velocidad del viento se debe al calentamiento diferencial de la tierra en su superficie durante el ciclo

diario de radiación. Una variación diurna típica es un aumento en la velocidad del viento durante el día con el viento velocidades más bajas durante las horas desde la medianoche hasta el amanecer. Las variaciones diarias en la radiación solar son las responsables de las variaciones diurnas del viento en las zonas templadas sobre latitudes sobre áreas de tierra relativamente planas. Los cambios diurnos más grandes generalmente ocurren en primavera y verano, y el más pequeños en invierno.

- Término corto (ráfagas y turbulencias): las variaciones a corto plazo generalmente significan variaciones en intervalos de tiempo de diez minutos o menos. Los promedios de diez minutos generalmente se determinan usando una frecuencia de muestreo de aproximadamente 1 segundo. Es generalmente aceptado que las variaciones en la velocidad del viento con períodos de menos de un segundo a diez minutos y que tienen un carácter estocástico se consideran turbulencias. Para aplicaciones de la energía del viento, las fluctuaciones turbulentas en el flujo necesitan ser cuantificadas. Por ejemplo, las consideraciones de diseño de la turbina pueden incluir predicción de carga máxima y fatiga, excitaciones estructurales, control, operación del sistema y calidad de energía. [13]

### **1.2.2.2 Variaciones debidas a la ubicación y dirección del viento**

Variaciones debido a la ubicación.

La velocidad del viento también depende mucho de las variaciones topográficas locales y de la cobertura del suelo.

Variaciones en la dirección del viento.

La dirección del viento también varía en las mismas escalas de tiempo en las que varían las velocidades del viento. Las variaciones estacionales pueden ser pequeñas, del orden de 30 grados, o los vientos mensuales promedio pueden cambiar dirección por 180 grados durante un año. Estas pequeñas variaciones en

la dirección del viento deben ser consideradas en el diseño de la turbina y su localización. [13]

### 1.2.3 Estimación del potencial del recurso eólico

En esta sección, el potencial disponible del recurso eólico y sus capacidades de producción de energía a través de aerogeneradores se resumirán.

#### 1.2.3.1 Energía eólica disponible

Como se aprecia en la imagen 7, se puede determinar el flujo másico de aire,  $dm/dt$ , a través del rotor área  $A$ . De la ecuación de continuidad de la mecánica de fluidos, el caudal másico de aire es función de la densidad del aire,  $\rho$ , y de la velocidad del aire (asumiéndola uniforme),  $U$ , por lo tanto:

$$\frac{dm}{dt} = \rho * A * U \quad (6)$$

La energía cinética por unidad de tiempo, es decir la potencia, del flujo es:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho * A * U^3 \quad (7)$$

La energía eólica por unidad de área,  $P/A$ , o densidad de energía eólica está dada por:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho * U^3 \quad (8)$$

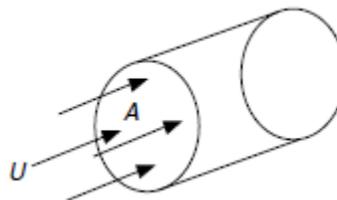


Imagen 7.- Flujo de aire a través del rotor de una turbina;  $U$  es la velocidad del viento y  $A$  es el área. [13]

Podemos concluir lo siguiente:

- El potencial eólico es directamente proporcional al área de barrido del rotor.
- La densidad de energía eólica es directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento.

En la práctica, lo máximo que se puede obtener del total de la energía eólica es aproximadamente de un 45~60%.

La densidad de energía eólica promedio, basada en promedios por hora, es:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho * \bar{U}^3 K_e \quad (9)$$

Donde  $\bar{U}$  es la velocidad anual promedio y  $K_e$  es el factor de patrón de energía y está dado por:

$$K_e = \frac{1}{N\bar{U}^3} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (10)$$

Donde N corresponde a las horas que tiene el año, 8760, y  $U_i$  la velocidad anual en promedio por hora.

Algunos ejemplos de evaluaciones de magnitud cualitativa del recurso eólico son:

$$\frac{\bar{P}}{A} < 100 \text{ W/m}^2\text{-bajo}$$

$$\frac{\bar{P}}{A} \approx 400 \text{ W/m}^2\text{-bueno}$$

$$\frac{\bar{P}}{A} > 700 \text{ W/m}^2\text{-excelente}$$

### 1.2.3.2 Estimación del recurso mundial

Basado en datos de recursos eólicos y una estimación de la eficiencia real de las turbinas eólicas reales, numerosos investigadores han realizado estimaciones del potencial de energía eólica de las regiones de la tierra y de toda la tierra misma. Se mostrará en el Capítulo 3 que la máxima producción de energía o el potencial que

puede aprovecharse teóricamente a partir de la energía cinética contenida en el viento es alrededor del 60% de la potencia disponible.

Usando estimaciones regionales, se puede estimar el potencial de producción (eléctrico) de la energía eólica. Es importante distinguir entre distintos potenciales de energía eólica que pueden ser estimados. Según el Consejo Mundial de Energía en 1993, identificó 5 categorías:

1. Potencial meteorológico: es equivalente al recurso eólico disponible.
2. Potencial del sitio: basado en el potencial meteorológico, pero se restringe a los sitios que son geográficamente aptos para la producción de energía.
3. Potencial técnico: se calcula a partir del potencial del sitio, tomando en cuenta la tecnología disponible.
4. Potencial económico: es el potencial técnico que puede llevarse a cabo económicamente.
5. Potencial de implementación: tiene en cuenta las limitaciones e incentivos para evaluar la capacidad de la turbina eólica que se puede implementar en un tiempo determinado. [13]

### **1.3 Características de la capa límite atmosférica**

La capa límite atmosférica, también conocida como capa límite planetaria, es la parte más baja de la atmósfera y sus características están directamente influenciadas por el contacto con la superficie terrestre. Aquí, cantidades físicas como la velocidad, la temperatura y la humedad relativa pueden cambiar rápidamente en el espacio y el tiempo. Por ejemplo, un parámetro importante en la caracterización del recurso eólico es la variación de la velocidad del viento horizontal con la altura sobre el suelo. Uno esperaría que la velocidad horizontal del viento sea cero en la superficie terrestre y aumente con altura en la capa límite atmosférica. Esta variación de la velocidad del viento con la elevación es llamado perfil vertical de la velocidad del viento o cizalladura vertical del viento. En ingeniería de energía eólica la determinación de la cizalladura vertical del viento es un parámetro de diseño importante ya que: (1) directamente determina la productividad de una

turbina eólica en una torre de cierta altura, y (2) puede influir en la vida útil de una pala de rotor de turbina. La vida de fatiga de la pala del rotor está influenciada por cargas cíclicas resultantes de la rotación a través de un campo de viento que varía en la dirección vertical. [13]

### **1.3.1 Densidad y presión atmosférica**

Como se demostró en la ecuación (8), el potencial eólico es función de la densidad del aire. La densidad del aire,  $\rho$ , es una función de temperatura,  $T$ , y presión,  $p$ , las cuales varían con la altura. La densidad del aire seco se puede determinar aplicando la ley de los gases ideales, que se puede expresar como:

$$\rho = \frac{p}{RT} = 3.4837 \frac{p}{T} \quad (11)$$

donde la densidad está en  $\text{kg/m}^3$ , la presión en kPa y la temperatura en Kelvin. La densidad estándar a nivel de mar corresponde a  $1.225 \text{ kg/m}^3$ . [13]

### **1.3.2 Estabilidad de la capa límite atmosférica**

Una característica particularmente importante de la atmósfera es su estabilidad: la tendencia a resistir movimiento vertical o para suprimir las turbulencias existentes. La estabilidad de la capa límite atmosférica es un factor determinante para los gradientes de velocidad del viento (por ejemplo, cizalladura del viento) que se experimentan en los primeros cientos de metros sobre el suelo. La estabilidad atmosférica generalmente se clasifica como estable, neutralmente estable o inestable. Un resumen de cómo la temperatura atmosférica cambia con la elevación (suponiendo una expansión adiabática) se desarrollará a continuación. [13]

#### **1.3.2.1 Tasa de caída**

La tasa de caída de la atmósfera generalmente se define como la tasa de cambio de temperatura con la altura. Como veremos a continuación, es muy fácil calcular la tasa de caída de la atmósfera calculando el cambio de presión por la altura y

utilizando relaciones termodinámicas convencionales. Si el aire en la atmósfera esta aproximadamente seco (se aproxima como gas ideal), su cambio de presión será:

$$dp = -\rho g dz \quad (12)$$

### **1.3.3 Turbulencia**

La turbulencia en el viento es causada por la disipación de la energía cinética del viento en energía térmica a través de la creación y destrucción de remolinos progresivamente más pequeños (o ráfagas). El viento turbulento puede tener una media relativamente constante durante períodos de tiempo de una hora o más, pero en tiempos más cortos (minutos o menos) puede ser bastante variable. La variabilidad del viento superficialmente parece ser bastante aleatorio, pero en realidad tiene características distintas. Estas características se caracterizan por un número de propiedades estadísticas:

- intensidad de turbulencia;
- función de densidad de probabilidad de velocidad del viento;
- auto correlación;
- escala de tiempo integral / escala de longitud;
- función de densidad espectral de potencia. [13]

#### **1.3.3.1 Intensidad de turbulencia**

Es la medida más básica de la turbulencia (ver imagen 8). Se define por la relación de la desviación estándar de la velocidad del viento a la velocidad media del viento. En este cálculo tanto la media y la desviación estándar se calculan durante un período de tiempo más largo que el de las fluctuaciones turbulentas, pero más cortas que los períodos asociados con otros tipos de variaciones de la velocidad del viento (como los efectos diurnos). La duración de este período de tiempo normalmente no es más de una hora, y por la convención en ingeniería de energía eólica suele ser igual a diez minutos. La frecuencia de muestreo es normalmente al

menos una vez por segundo (1 Hz). La intensidad de la turbulencia,  $IT$ , se define por:

$$IT = \frac{\sigma_u}{U} \quad (13)$$

donde  $\sigma_u$  es la desviación estándar, y está dada por:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N_s-1} \sum_{i=1}^{N_s} (u_i - U)^2} \quad (14)$$

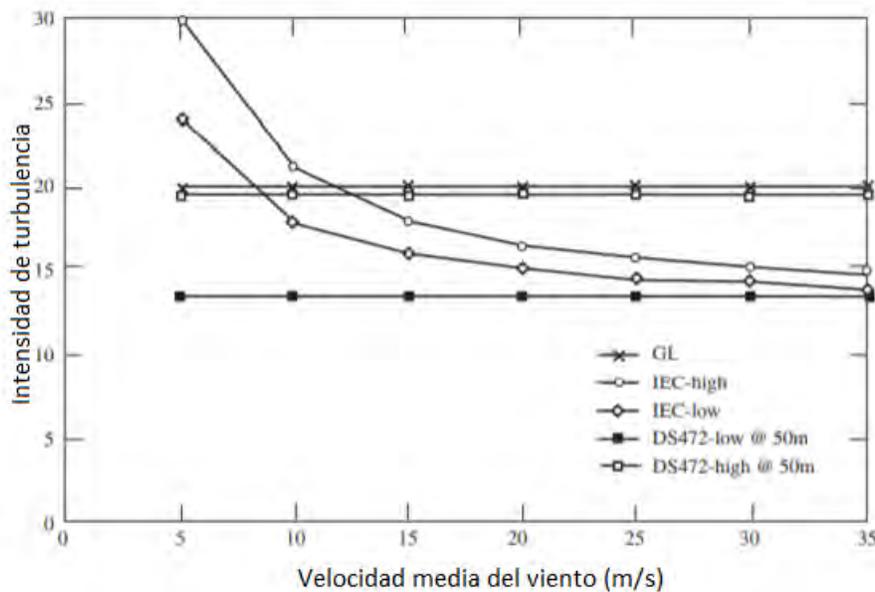


Imagen 8.- Intensidad de turbulencia para diferentes estándares. [14]

### 1.3.3.2 Función de densidad de probabilidad de velocidad del viento

La probabilidad de que la velocidad del viento tenga un valor particular se puede describir en términos de función de densidad de probabilidad. La experiencia ha demostrado que la velocidad del viento es más probable que esté cerca del valor medio que lejos de él, y que es casi tan probable que esté por debajo del valor medio que sobre él. La función de densidad de probabilidad que mejor describe este tipo de comportamiento para la turbulencia es la distribución Gaussiana o normal. La

función de densidad de probabilidad normal para datos continuos en términos de las variables utilizadas aquí viene dada por:

$$p(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(u-U)^2}{2\sigma_u^2}\right] \quad (15)$$

En la imagen 9 se aprecia un histograma de las velocidades del viento sobre la velocidad media del viento.

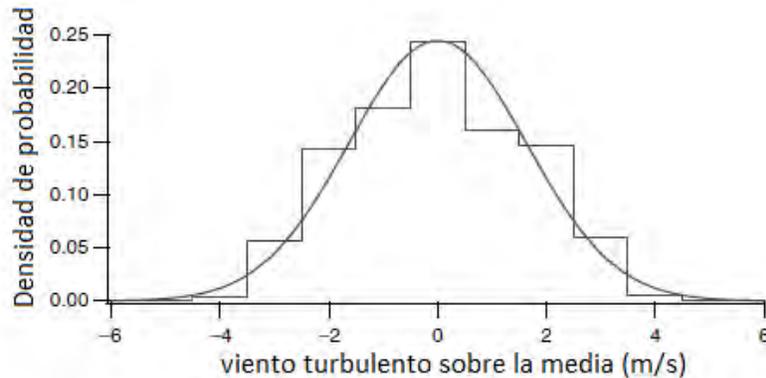


Imagen 9.- Probabilidad Gaussiana de la función de densidad y un histograma de datos del viento. [13]

### 1.3.3.3 Auto correlación

La función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento proporciona una medida de la probabilidad de valores particulares de la velocidad del viento. La auto correlación normalizada para la función para datos de velocidad de viento turbulenta muestreada viene dada por:

$$R(r \delta t) = \frac{1}{\sigma_u^2(N_s-r)} \sum_{i=1}^{N_s-r} u_i u_{i+1} \quad (16)$$

donde r es el número de retraso.

### 1.3.3.4 Escala de tiempo integral / escala de longitud

La función de auto correlación puede, si se eliminan las tendencias antes de comenzar el proceso, decaer de un valor de 1.0 en un retraso de cero a un valor de cero, y luego tenderá a tomar pequeños valores positivos o negativos a medida que aumenta el retraso. El único valor resultante se conoce como escala de tiempo integral de la turbulencia mientras que los valores típicos son menos de diez segundos. La escala de tiempo integral es una función del sitio, la estabilidad atmosférica y otros factores pueden ser significativamente mayor de diez segundos.

Multiplicar la escala de tiempo integral por la velocidad media del viento da la escala de longitud integral. La escala de longitud integral tiende a ser más constante en un rango de velocidades del viento que la escala de tiempo integral, y por lo tanto es algo más representativo de un sitio. [13]

#### **1.3.3.5 Función de densidad espectral de potencia**

Las fluctuaciones en el viento pueden considerarse como resultado de una combinación sinusoidalmente de vientos variables superpuestos al viento constante medio. Estas variaciones sinusoidales tendrán una variedad de frecuencias, amplitudes y fases. El término "espectro" se utiliza para describir funciones de frecuencia. Por lo tanto, la función que caracteriza la turbulencia como una función de la frecuencia se conoce como función de "densidad espectral". Dado que el valor promedio de cualquier senoide es cero, las amplitudes se caracterizan en términos de sus valores cuadrados medios. Este tipo de análisis se originó en aplicaciones de energía eléctrica, donde el cuadrado del voltaje o la corriente es proporcional al poder. El nombre completo de la función que describe la relación entre frecuencia y amplitudes de ondas sinusoidales que componen la velocidad del viento fluctuante es, por lo tanto, "densidad espectral de potencia". [13]

### 1.3.4 El viento constante: variación de la velocidad del viento con la altura

Como se muestra en la imagen 10, la velocidad real del viento varía en el espacio y el tiempo. La velocidad real del viento, en cualquier lugar, también varía en tiempo y dirección alrededor de su valor medio debido al efecto de la turbulencia. De mayor importancia aquí, esta figura muestra claramente que la media la velocidad del viento aumenta con la altura, lo que define el fenómeno llamado cizalladura del viento.

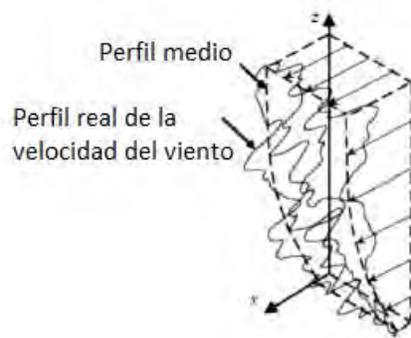


Imagen 10.- Perfil de velocidad experimental (van der Tempel, 2006). [13]

La cizalladura del viento influye tanto en la evaluación de los recursos eólicos como en el diseño de turbinas de viento. Primero, la evaluación de los recursos eólicos en un área geográfica amplia podría requerir que los datos del anemómetro de varias fuentes se corrijan a una elevación común. Segundo, desde un aspecto de diseño, la vida de fatiga de la pala del rotor estará influenciada por las cargas cíclicas resultante de la rotación a través de un campo de viento que varía en la dirección vertical. Por lo tanto, un modelo de la variación de la velocidad del viento con la altura es necesaria en las aplicaciones de energía eólica. A continuación, se presentarán algunos de los modelos actuales que se utilizan para predecir la variación de la velocidad de viento con elevación sobre el suelo.

En los estudios de energía eólica, generalmente se han utilizado dos modelos matemáticos o "leyes" para modelar el perfil vertical de la velocidad del viento sobre regiones de terreno plano y homogéneo (por ejemplo, campos, desiertos y

praderas). El primer enfoque, la ley logarítmica, tiene su origen en el flujo de la capa límite en mecánica de fluidos y en investigación atmosférica. Se basa en una combinación teórica e investigación empírica. El segundo enfoque, utilizado por muchos investigadores de energía eólica, es la ley de la potencia. Ambos enfoques están sujetos a la incertidumbre causada por la naturaleza compleja y variable de flujos turbulentos. [13]

### 1.3.4.1 La ley logarítmica

Aunque hay varias maneras de llegar a una predicción de un perfil de viento logarítmico, (por ejemplo, teoría de la longitud de mezcla, teoría de la viscosidad Eddy y teoría de la similitud), un tipo de longitud de mezcla es el análisis dado por Wortman (1982) se resume aquí.

Cerca de la superficie de la tierra, la ecuación de momento se reduce a:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} \quad (17)$$

donde  $x$  y  $z$  son coordenadas horizontal y vertical respectivamente,  $p$  es la presión y  $\tau_{xz}$  es el esfuerzo cortante en la dirección  $x$  y normal a  $z$ .

En esta región, la presión es independiente de  $z$  y la integración produce:

$$\tau_{xz} = \tau_0 + z \frac{\partial p}{\partial x} \quad (18)$$

donde  $\tau_0$  es el valor superficial del esfuerzo cortante. Cerca de la superficie, el gradiente de presión es pequeño, entonces el segundo término en el lado derecho puede ser despreciado. Además, usando la teoría de la longitud de mezcla de Prandtl, el esfuerzo cortante se puede expresar como:

$$\tau_{xz} = \rho l^2 \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad (19)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $U$  es la componente horizontal de velocidad y  $l$  es la longitud de mezcla.

Combinando las ecuaciones 18 y 19:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \frac{U^*}{l} \quad (20)$$

donde  $U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ , se define como la velocidad de fricción.

Si se supone una superficie lisa,  $l=k^*z$ , con  $k=0.4$  (constante de von Karman), entonces la ecuación (20) se puede integrar directamente de  $z_0$  a  $z$ , donde  $z_0$  es la longitud de la rugosidad de la superficie, que caracteriza la aspereza del terreno. Esto produce:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (21)$$

Esta ecuación se conoce como el *perfil logarítmico del viento*.

La ecuación (21) también se puede escribir de la siguiente manera:

$$\ln(z) = \left(\frac{k}{U^*}\right) U(z) + \ln(z_0) \quad (22)$$

### 1.3.4.2 Perfil de la ley de potencia

La ley de potencia representa un modelo simple para el perfil vertical de la velocidad de viento. Su forma básica es:

$$\left(\frac{U(z)}{U(z_r)}\right) = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (23)$$

donde  $U(z)$  es la velocidad del viento a la altura  $z$ ,  $U(z_r)$  es la velocidad de viento de referencia a la altura  $z_r$  y  $\alpha$  es el exponente de la ley de potencia.

Los primeros trabajos sobre este tema mostraron que, bajo ciertas condiciones,  $\alpha$  es igual a  $1/7$ , lo que indica una correspondencia entre los perfiles del viento y el

flujo sobre placas planas. En la práctica, el exponente  $\alpha$  es una cantidad muy variable. [13]

### **1.3.5 Efecto del terreno en las características del viento**

Algunos efectos del terreno sobre el viento son déficit de velocidad, cizalladura de viento y aceleración inusual. La influencia de las características del terreno en la producción de energía de una turbina puede ser tan bueno que la economía de todo el proyecto puede depender de la selección adecuada del sitio. [13]

#### **1.3.5.1 Clasificación del terreno**

La clasificación más básica del terreno lo divide en terreno plano y no plano. Muchos autores definen terreno no plano como terreno complejo (se define como un área donde los efectos del terreno son significativos en el flujo de viento sobre el área de tierra que se está considerando). El terreno plano es terreno con pequeñas irregularidades, tales como bosques. El terreno no plano tiene gran escala de elevaciones o depresiones como colinas, crestas, valles y cañones. Para calificar como terreno plano, se deben cumplir las siguientes condiciones. Tenga en cuenta que algunas de estas reglas incluyen la geometría de la turbina eólica:

- Las diferencias de elevación entre el sitio de la turbina eólica y el terreno circundante no son mayores a aproximadamente 60 m en cualquier lugar en un círculo de 11.5 km de diámetro alrededor del sitio de la turbina.
- Ninguna colina tiene una relación de aspecto (altura a ancho) mayor que 1/50 dentro de los 4 km aguas arriba y aguas abajo del sitio.
- La diferencia de elevación entre el extremo inferior del disco del rotor y la elevación más baja en el terreno es mayor a tres veces la diferencia máxima de elevación (h) dentro de 4 km aguas arriba (ver imagen 11).

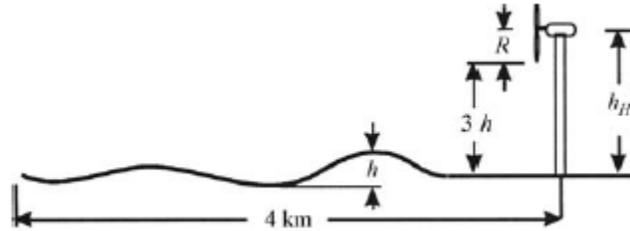


Imagen 11.- Determinación de un terreno plano. [13]

El terreno no plano o complejo, según Hiester y Pennell (1981), consiste en una gran variedad de características, y uno generalmente usa las siguientes subclasificaciones: (1) elevación o depresión aislado, y (2) terreno montañoso. [13]

#### 1.4 Análisis de datos de viento y estimación de recurso eólico

En esta sección se supone que se ha recopilado una gran cantidad de datos de viento. Estos datos podrían incluir datos de dirección, así como datos de velocidad del viento. Hay varias formas de resumir los datos en una forma compacta para que uno pueda evaluar el recurso eólico o el viento potencial de producción de energía de un sitio en particular. Esta sección revisará lo siguiente temas:

- Producción de energía en turbinas eólicas en general;
- Método directo (no estadístico) para el análisis de datos y caracterización del recurso eólico;
- Análisis estadístico de datos de viento y caracterización de recurso eólico;
- Estimaciones de productividad de aerogeneradores basadas en datos estadísticos. [13]

##### 1.4.1 Aspectos generales de la producción de energía de turbinas eólicas

En esta sección determinaremos la productividad (tanto el potencial energético máximo como la salida de potencia de la máquina) de una turbina eólica dada en un sitio dado en el que la información de la velocidad del viento está disponible en

formato de serie temporal o en formato de resumen (velocidad media del viento, estándar desviación, etc.).

La potencia disponible en el viento está dada por  $P=1/2\rho AU^3$  como ya vimos en la sección 1.2. En la práctica la potencia disponible ( $P_w$ ) de una turbina eólica puede ser mostrada por una curva máquina-potencia. Dos curvas típicas,  $P_w(U)$ , simplificadas para efectos de ilustración, se muestran en la imagen 12. Normalmente estas curvas están basadas en datos de pruebas, basados en la norma IEC (2005) o AWEA (1988). [13]

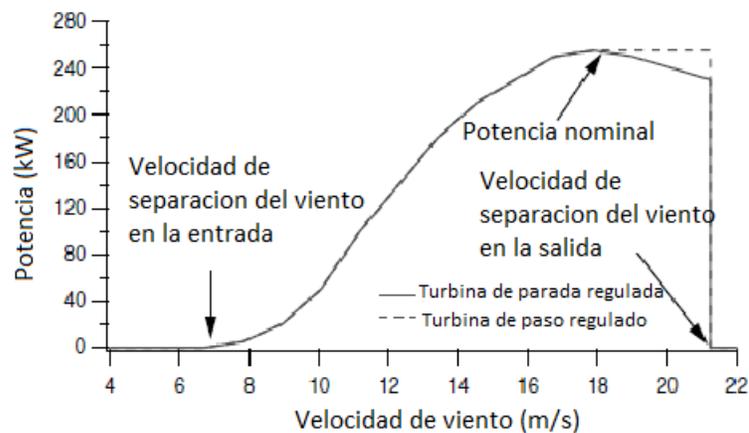


Imagen 12.- Curva de salida de potencia de una turbina eólica. [13]

## 1.4.2 Métodos directos de análisis de datos, caracterización de recursos, y productividad de la turbina

### 1.4.2.1 Uso directo de los datos

Suponiendo que tenemos un número  $N$  de observaciones de velocidad de viento,  $U_i$ , cada uno promediado sobre un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Estos datos se pueden usar para calcular unos parámetros muy útiles:

1) La velocidad media del viento a largo plazo,  $\bar{U}$ , durante el período total de recopilación de datos es:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (24)$$

2) La desviación estándar de los promedios individuales de velocidad del viento,  $\sigma_u$  es:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \{ \sum_{i=1}^N U_i^2 - N\bar{U}^2 \}} \quad (25)$$

3) La densidad de energía eólica promedio,  $\bar{P}/A$ , es la energía eólica disponible promedio por unidad de área y viene dado por:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (26)$$

De forma similar, la densidad de energía eólica por unidad de área para un periodo de tiempo extendido  $N\Delta t$  es:

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{1}{2} \rho \Delta t \sum_{i=1}^N U_i^3 = \frac{\bar{P}}{A} (N\Delta t) \quad (27)$$

4) La potencia promedio de la turbina eólica,  $\bar{P}_w$ , es:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{P}_w U_i \quad (28)$$

5) La energía de la turbina eólica,  $\bar{E}_w$ , es:

$$E_w = \sum_{i=1}^N \bar{P}_w(U_i)(\Delta t) \quad (29)$$

#### 1.4.2.2 Método de los contenedores

El método de los contenedores también proporciona una forma de resumir los datos del viento y determinar los resultados esperados de productividad de la turbina. Los datos primero deben separarse en intervalos de velocidad del viento o contenedores en que ocurren, es más conveniente usar contenedores del mismo tamaño. Supongamos que los datos son separados en contenedores  $N_B$  de ancho  $w_j$ , con

puntos medios  $m_j$ , y con  $f_j$ , el número de ocurrencias en cada contenedor o frecuencia, de modo que:

$$N = \sum_{j=1}^{N_B} f_j \quad (30)$$

Los valores encontrados en las ecuaciones 24-26, 28 y 29, se pueden determinar a partir de:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \quad (31)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^{N_B} m_j^2 f_j - N \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \right)^2 \right\}} \quad (32)$$

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j^3 f_j \quad (33)$$

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} \bar{P}_w(m_j) f_j \quad (34)$$

$$E_w = \sum_{i=1}^N \bar{P}_w(m_j) f_j (\Delta t) \quad (35)$$

Por lo general, el histograma (gráfico de barras) muestra el número de ocurrencias y el ancho de los contenedores trazado cuando se utiliza este método (imagen 13).

[13]

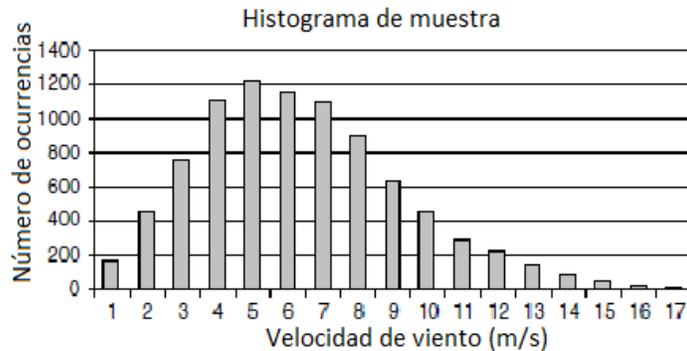


Imagen 13.- Histograma típico. [13]

### 1.4.2.3 Curvas de velocidad y duración de los datos

Estas curvas se pueden utilizar para comparar el potencial eólico de distintos sitios candidatos. Como se define en este texto, la curva de duración de la velocidad es un gráfico con velocidad del viento en el eje y y el número de horas en el año para las cuales la velocidad es igual o excede cada valor particular en el eje x.

La curva de duración de velocidad se puede convertir en una curva de duración de potencia cubicando las ordenadas, que son proporcionales a la energía eólica disponible para un área de barrido de rotor dada. La diferencia entre el potencial energético de diferentes sitios es visualmente aparente, porque las áreas bajo las curvas son proporcionales a la energía anual disponible del viento. Los siguientes pasos deben llevarse a cabo para construir curvas de duración de velocidad y potencia a partir de datos:

- organizar los datos en contenedores;
- encontrar el número de horas que se excede una velocidad dada (o potencia por unidad de área);
- graficar las curvas resultantes.

En la imagen 14 se muestra un ejemplo de estas curvas para distintos lugares de planeta.

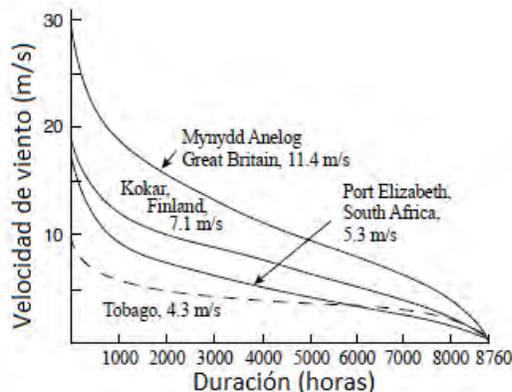


Imagen 14.- Ejemplo de curvas de duración de velocidad para distintas partes del mundo. [13]

### 1.4.3 Análisis estadístico de datos de viento

El análisis estadístico se puede utilizar para determinar el potencial de energía eólica de un sitio determinado y para estimar la producción de energía de una turbina eólica instalada allí.

Para el análisis estadístico, una distribución de probabilidad es un término que describe la probabilidad de que ocurrirán ciertos valores de una variable aleatoria (como la velocidad del viento). Como se discute a continuación, las distribuciones de probabilidad se caracterizan típicamente por una función de densidad de probabilidad o una función de densidad acumulativa. [13]

#### 1.4.3.1 Función de densidad de probabilidad

La frecuencia con que ocurren las velocidades de viento puede ser descrita por la función de densidad de probabilidad,  $p(U)$ , de la velocidad del viento. Puede usarse para expresar la probabilidad que la velocidad de viento ocurra entre  $U_a$  y  $U_b$ :

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU \quad (36)$$

Además, el área total bajo la curva de la densidad de probabilidad está dada por:

$$\int_0^{\infty} p(U) dU = 1 \quad (37)$$

Si  $p(U)$  es conocida, se pueden calcular los siguientes parámetros:

Velocidad media del viento,  $\bar{U}$ :

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U p(U) dU \quad (38)$$

Desviación estándar de la velocidad del viento,  $\sigma_u$ :

$$\sigma_u = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 p(U) dU} \quad (39)$$

La media de la potencia disponible,  $\bar{P}/A$ :

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} U^3 p(U) dU = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 \quad (40)$$

### 1.4.3.2 Función de distribución acumulativa

La función de distribución acumulativa  $F(U)$  representa la fracción de tiempo o probabilidad de que la velocidad de viento sea más pequeña o igual a la velocidad de viento dada,  $U$ . Esto es:  $F(U)$ =probabilidad ( $U' \leq U$ ), donde  $U'$  es una variable ficticia. Está dada por:

$$F(U) = \int_0^U p(U') dU' \quad (41)$$

### 1.4.3.3 Funciones de probabilidad usadas comúnmente

Dos distribuciones de probabilidad se usan comúnmente en el análisis de datos de viento: (1) Rayleigh y (2) Weibull. La distribución de Rayleigh utiliza un parámetro: la velocidad media del viento. La distribución de Weibull se basa en dos parámetros  $y$ , por lo tanto, puede representar mejor una variedad más amplia de regímenes de viento. Las distribuciones de Rayleigh y Weibull se denominan distribuciones "sesgadas" ya que se definen solo para valores mayores que 0.

#### Distribución de Rayleigh.

Esta es la distribución de probabilidad de velocidad más simple para representar el recurso eólico ya que requiere solo un conocimiento sobre la velocidad media del viento,  $\bar{U}$ . La función de densidad de probabilidad y La función de distribución acumulativa viene dada por:

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right) \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right] \quad (42)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right] \quad (43)$$

La imagen 15 ilustra una función de densidad de probabilidad de Rayleigh para diferentes velocidades de viento medias. Como se muestra, un valor mayor de la velocidad media del viento da una mayor probabilidad de mayores velocidades del viento.

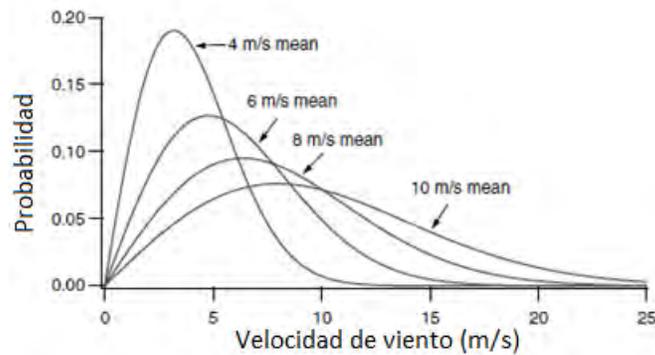


Imagen 15.- Ejemplo de la función de densidad de probabilidad de Rayleigh. [13]

### Probabilidad de Weibull.

El uso de la función de densidad de probabilidad de Weibull requiere el conocimiento de dos parámetros:  $k$ , un factor de forma, y  $c$ , un factor de escala. Ambos parámetros son funciones de  $\bar{U}$  y  $\sigma_u$ . La función de densidad de probabilidad de Weibull y la función de distribución acumulativa están dadas por:

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (44)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (45)$$

Se dan ejemplos de una función de densidad de probabilidad de Weibull, para varios valores de  $k$ , como se muestra en la imagen 16. Como se muestra, a medida que aumenta el valor de  $k$ , la curva tiene un pico más agudo, lo que indica que hay menos variación en la velocidad del viento. [13]

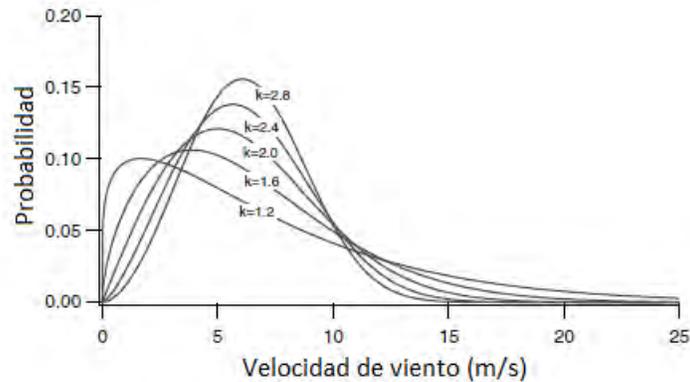


Imagen 16.- Ejemplo de la función de densidad de probabilidad de Weibull. [13]

#### 1.4.4 Velocidades extremas de viento

El factor meteorológico principal en la evaluación de un posible sitio de aerogenerador es la media velocidad del viento. Otra consideración importante es anticipar la velocidad extrema del viento. Esta es la mayor velocidad del viento esperada en un período de tiempo relativamente largo. Las velocidades extremas del viento son de particular preocupación en el proceso de diseño, ya que la turbina debe ser diseñada para soportar esas condiciones probables, pero poco frecuentes. [13]

#### 1.5 Estimaciones de producción de energía de turbinas eólicas usando técnicas estadísticas

Para una función de densidad de probabilidad de régimen de viento dada,  $p(U)$ , y una curva de potencia de turbina conocida,  $P_w(U)$ , la potencia media de la turbina eólica,  $\overline{P_w}$ , viene dada por:

$$\overline{P_w} = \int_0^{\infty} P_w(U)p(U)dU \quad (46)$$

La potencia promedio de la turbina eólica,  $\overline{P_w}$ , también se puede usar para calcular un parámetro de rendimiento relacionado, el factor de capacidad, CF. El factor de capacidad de una turbina eólica en un sitio determinado es definido como la relación entre la energía realmente producida por la turbina y la energía que podría producir

si la máquina funcionara a su potencia nominal,  $P_R$ , durante un período de tiempo determinado. Así:

$$CF = \frac{\bar{P}_w}{P_R} \quad (47)$$

Es posible determinar una curva de potencia de una turbina basada en la potencia disponible en el viento y el coeficiente de potencia del rotor,  $C_P$ . El resultado es la siguiente expresión para  $P_w(U)$ :

$$P_w(U) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta U^3 \quad (48)$$

donde  $\eta$  es la eficiencia del tren de engranajes (potencia del generador/ potencia del rotor). El coeficiente de la potencia del rotor,  $C_P$ , se calcula como:

$$C_P = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (49)$$

El  $C_P$  generalmente se expresa en función de la relación de velocidad de punta,  $\lambda$ , (imagen 17) se expresa como:

$$\lambda = \frac{\text{velocidad de punta del aspa}}{\text{velocidad de viento}} = \frac{\omega R}{U} \quad (50)$$

donde  $\omega$  es la velocidad angular (rad/s) del rotor de la turbina y  $R$  es el radio del rotor.

Por lo tanto, suponiendo un valor constante para la eficiencia del tren de transmisión, otra expresión para la potencia promedio de la turbina eólica viene dada por:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \eta \int_0^{\infty} C_p(\lambda) U^3 p(U) dU \quad (51)$$

Ahora estamos en condiciones de utilizar métodos estadísticos para la estimación de la productividad de una turbina eólica específica en un sitio determinado con un mínimo de información. [13]

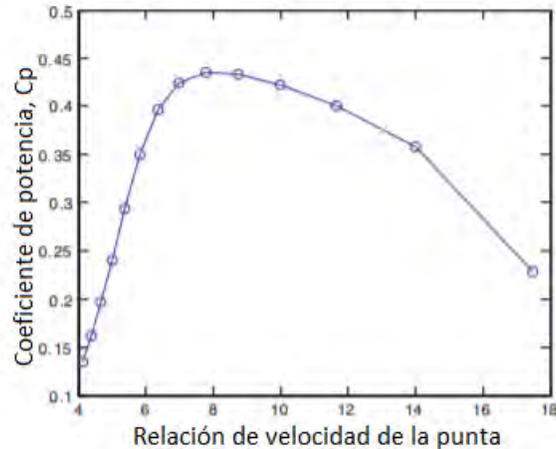


Imagen 17.- Variación del  $C_p$  con la velocidad de punta del aspa para una turbina Vestas V80. [15]

## 1.6 Aerodinámica de las turbinas de viento

### 1.6.1 Introducción

La producción de potencia de una turbina de viento depende de la interacción entre el rotor y el viento. Los prácticos diseños de turbinas eólicas de eje horizontal utilizan perfil aerodinámico para transformar la energía cinética en el viento en energía útil.

Comenzaremos con el análisis de un rotor de aerogenerador idealizado. El análisis también se utilizará para determinar los límites teóricos de rendimiento para aerogeneradores. [13]

### 1.6.2 Teoría de momento y límite de Betz

Un modelo simple, atribuido a Betz, es usado para determinar la potencia del rotor de una turbina ideal, el empuje del viento en el rotor y el efecto del rotor en operación en el campo de viento local. Este modelo simple está basado en la teoría de momento lineal desarrollada hace más de 100 años para predecir el desempeño de las propelas de los barcos.

El análisis asume un volumen de control, en el que los límites del volumen de control son las superficies de un tubo de corriente de aire y dos secciones transversales del tubo de corriente de aire (imagen 18). El único flujo es a través de los extremos del

tubo de corriente. La turbina está representada por un “disco actuador” uniforme que crea una discontinuidad de presión en el tubo de corriente que fluye a través de él. [13]

### Límite del tubo de corriente

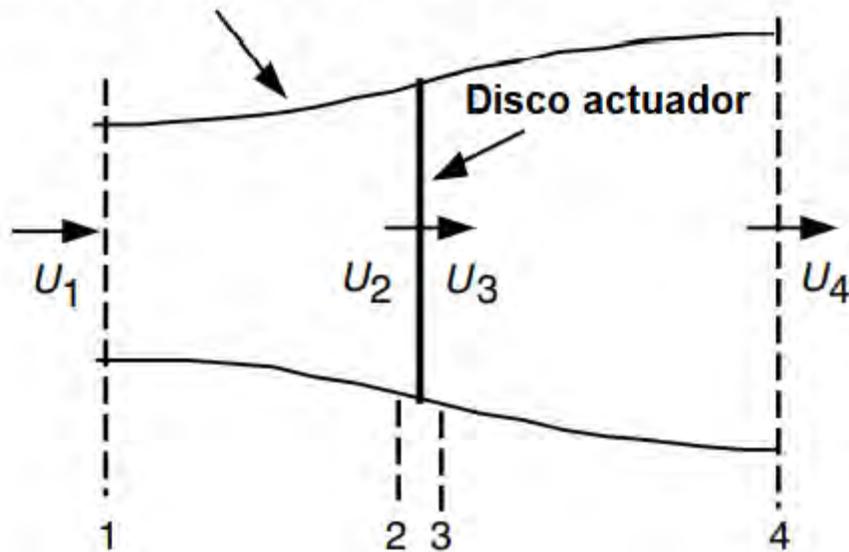


Imagen 18.- Modelo del disco actuador de una turbina de viento;  $U$ , es la velocidad del viento; 1, 2, 3 y 4 son ubicaciones. [13]

Este análisis utiliza los siguientes supuestos:

- flujo homogéneo, incomprensible y estable;
- sin arrastre debido a la fricción;
- número infinito de álabes;
- empuje uniforme a través del área del disco actuador;
- una estela no giratoria;
- la presión estática aguas arriba y aguas abajo del rotor es igual a la presión estática ambiental no perturbada.

Aplicando la conservación del momento lineal al volumen de control que encierra el conjunto del sistema, se puede encontrar la fuerza neta que actúa sobre el contenido del volumen de control. Esa fuerza es igual y opuesta al empuje,  $T$ , que es la fuerza del viento sobre la turbina eólica. Para la conservación del momento

lineal para un flujo unidimensional, incompresible, invariante en el tiempo, el empuje es igual y opuesto a la tasa de cambio de impulso de la corriente de aire:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (52)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  el área de sección transversal del disco actuador,  $U$  es la velocidad del aire y los sufijos 1 y 4 indican la ubicación de la sección transversal.

Para flujo estable,  $U_1(\rho AU)_1 = U_4(\rho AU)_4 = \dot{m}$ , donde  $\dot{m}$  es el flujo másico. Entonces:

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (53)$$

Por tanto, la ecuación de Bernoulli puede ser aplicada en los dos volúmenes de control a cada lado del disco actuador. En el tubo corriente aguas arriba del disco:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (54)$$

En el tubo corriente aguas abajo del disco:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (55)$$

El empuje puede expresado como la suma neta de las fuerzas a cada lado del disco actuador:

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (56)$$

Resolviendo para  $(p_2 - p_3)$  en las ecuaciones (54) y (55), y sustituyendo en la ecuación (56), tenemos:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (57)$$

Igualando las ecuaciones de empuje (56) y (57), y sabiendo que el flujo másico es  $\rho A_2 U_2$ , obtenemos:

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (58)$$

Observamos, que la velocidad del viento en el plano del rotor, es el promedio de las velocidades aguas abajo y aguas arriba.

Ahora definimos el factor de inducción axial,  $a$ , como la fracción de disminución en la velocidad del viento entre la corriente libre y el plano del rotor, entonces:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (59)$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (60)$$

y para  $U_4$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (61)$$

La expresión  $U_1 a$  se denomina velocidad inducida en el rotor, la velocidad del viento en el rotor es una combinación de la velocidad de la corriente libre y la velocidad inducida del viento. A medida que el factor de inducción axial aumenta desde 0, la velocidad del viento detrás del rotor se ralentiza cada vez más. Si  $a = \frac{1}{2}$ , el viento ha disminuido a velocidad cero detrás del rotor y la teoría simple ya no es aplicable. [13]

La potencia de salida,  $P$ , es igual al empuje multiplicado por la velocidad en el disco actuador:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 U_2 (U_1 + U_4) (U_1 - U_4) \quad (62)$$

Sustituyendo  $U_1$  y  $U_4$  de las ecuaciones (60) y (61), en (62), tenemos:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1 - a)^2 \quad (63)$$

donde, el área del rotor en el volumen de control,  $A_2$ , fue reemplazada por  $A$ , el área del rotor, y la velocidad de la corriente libre,  $U_1$ , fue reemplazada por  $U$ .

Como ya vimos, una forma de expresar el desempeño de una turbina eólica es mediante su coeficiente de potencia,  $C_P$ , que ya vimos en la ecuación (49), ahora expresaremos el coeficiente de potencia en función del factor de inducción axial:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (64)$$

El coeficiente de potencia es adimensional y representa la fracción de potencia del viento que es extraída por el rotor.

El  $C_{p,máx}$  se obtiene cuando  $a = \frac{1}{3}$ , obteniendo:

$$C_{p,máx} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (65)$$

Esto indica que, si un rotor ideal fuera diseñado para funcionar tal que, la velocidad del viento en el rotor fuera  $\frac{2}{3}$  de la velocidad del viento de la corriente libre, entonces estaría trabajando en el punto de máxima producción de energía.

A partir de las ecuaciones (57), (60) y (61) obtenemos el empuje axial en el disco:

$$T = \frac{1}{2} \rho A U^2 [4a(1 - a)] \quad (66)$$

Similar que, con la potencia, el empuje en una turbina puede ser caracterizado con un coeficiente adimensional, el coeficiente de empuje:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (67)$$

## **CAPÍTULO II. NORMA IEC-61400-2**

### **2.1 Norma IEC 61400-2: diseño estructural**

#### **2.1.1 Generalidades**

El diseño estructural del aerogenerador debe basarse en la verificación de la integridad estructural de los componentes situados en las líneas de carga crítica desde las palas del rotor hasta la cimentación. Las solicitaciones límite y de fatiga de las partes estructurales (por ejemplo, palas, rotor, buje, góndola, eje de orientación, la torre, las conexiones) deben verificarse por cálculos y/o ensayos para determinar la integridad estructural del AP con el nivel de seguridad apropiado. [16]

#### **2.1.2 Metodología del diseño**

Debe verificarse que los estados límite no se excedan en el diseño del aerogenerador.

Hay tres formas dadas para determinar las cargas de cálculo del aerogenerador, como son:

- 1) metodología de cargas simplificadas;
- 2) modelo de simulación;
- 3) medición de la carga a escala real. [16]

#### **2.1.3 Cargas e hipótesis de cargas**

##### **2.1.3.1 Vibración, cargas de inercia y gravitacionales**

Las cargas de inercia y gravitacionales son cargas estáticas y dinámicas que actúan sobre el AP como resultado de la inercia, de los efectos giroscópicos, la vibración y la actividad sísmica de la estructura de soporte como barcos, etc.

Debe proporcionarse un análisis de resonancia, tal como el facilitado por un diagrama de Campbell para los principales componentes estructurales del aerogenerador. [16]

### **2.1.3.2 Cargas aerodinámicas**

Las cargas aerodinámicas son las cargas estáticas y dinámicas causadas por el flujo de aire y su interacción con las partes estacionarias y móviles del AP. El flujo de aire se debe considerar dependiente de la velocidad de rotación del rotor, de la velocidad del viento a través del plano del rotor, de la turbulencia, de la densidad del aire y de las formas aerodinámicas de los componentes del aerogenerador y sus efectos interactivos, incluyendo los efectos aeroelásticos. [16]

### **2.1.3.3 Cargas operacionales**

Las cargas operacionales resultan del funcionamiento y control del aerogenerador. Las cargas operacionales pueden ser causadas por el proceso de orientación, el de frenado, el de plegado del rotor, el cambio de paso de las palas, la conexión a la red, etc. [16]

### **2.1.3.4 Otras cargas**

Se deben considerar también todas las cargas que pueden aparecer debido a entornos de operación especiales especificados por el fabricante (por ejemplo, cargas ondeantes, cargas debidas a estelas, cargas por el hielo, cargas de transporte, montaje, mantenimiento y de reparación, etc). [16]

### **2.1.3.5 Hipótesis de cargas**

A efectos de diseño, la vida útil de un AP se puede representar por un conjunto de estados de diseño que cubran las condiciones más significativas que pueda experimentar el aerogenerador.

Las hipótesis de carga deben determinarse a partir de la combinación del montaje, del izado, del mantenimiento y de modos de funcionamiento o estados de diseño específicos con las condiciones externas. Deben considerarse todas las hipótesis

de carga relevantes con una probabilidad razonable de incidencia, junto con el comportamiento de los sistemas de control y de protección. [16]

Por lo general, las hipótesis de carga de diseño utilizados para determinar la integridad estructural del AP pueden calcularse de las siguientes combinaciones:

- Operación del aerogenerador sin fallo y condiciones externas normales;
- Operación del aerogenerador sin fallo y condiciones externas extremas;
- Operación del aerogenerador sin fallo y situaciones externas apropiadas; y
- Situaciones de diseño para el transporte, la instalación y mantenimiento y las situaciones externas apropiadas.

Si existe correlación significativa entre una condición externa extrema y una situación de fallo, debe considerarse una combinación realista de las dos como una hipótesis de carga de diseño.

En cada estado de diseño, deben considerarse varias hipótesis de carga para verificar la integridad estructural de los componentes del AP. Como mínimo, deben considerarse las hipótesis de la Tabla 1. En esta tabla las hipótesis de carga de diseño se especifican para cada estado de diseño por la descripción del viento, las condiciones eléctricas y otras condiciones externas. [16]

Cuando el sistema de control y de protección no controla y limita ciertos parámetros del aerogenerador se deben tener en cuenta en las hipótesis de carga. Ejemplo de tales parámetros son los siguientes:

- Torsión de cables;
- Vibraciones;
- Velocidad del rotor; y
- Fenómenos de aleteos o trepidaciones

Situación de diseño	Hipótesis de carga		Flujo del viento	Tipo de análisis	Observaciones
Producción de energía	A	Operación normal		F	
	B	Orientación	$V_{hub} = V_{design}$	U	
	C	Error de orientación	$V_{hub} = V_{design}$	U	
	D	Empuje máximo	$V_{hub} = 2,5 V_{ave}$	U	Rotación del rotor pero puede estar plegándose o aleteando
Producción de energía más ocurrencia de fallo	E	Velocidad de rotación máxima		U	
	F	Cortocircuito en la conexión de carga	$V_{hub} = V_{design}$	U	Par generador en cortocircuito máximo
Parada	G	Desconexión (frenado)	$V_{hub} = V_{design}$	U	
Carga extrema del viento	H	Carga extrema del viento	$V_{hub} = V_{c50}$	U	El aerogenerador puede estar inmovilizado (en ralenti o parada) o regulado. Ninguna intervención manual
Condiciones de inmovilización y de falta	I	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	$V_{hub} = V_{ref}$	U	El aerogenerador es cargado con la exposición más desfavorable
Transporte, montaje, mantenimiento y reparación	J	Deberá estar indicado por el fabricante		U	
Leyenda F análisis de cargas debidas a fatiga. U análisis de cargas críticas.					

Tabla 1. Hipótesis de carga de diseño para el método de cálculo de cargas simplificadas. [16]

Para cada estado de diseño, se expone el tipo apropiado de análisis por “F” y por “U”. F se refiere al análisis de las cargas por fatiga, a emplear en la valoración del esfuerzo por fatiga. U se refiere al análisis de las cargas críticas tales como el análisis del exceso de resistencia máxima del material, el análisis de la deformación extrema y el análisis de la estabilidad. [16]

## 2.1.4 Metodología de cargas simplificadas

### 2.1.4.1 Generalidades

Para determinadas configuraciones de aerogeneradores, las cargas pueden obtenerse utilizando ecuaciones conservadoras y simples para un número limitado de hipótesis de carga. Si la configuración del aerogenerador no se ajusta a los

requisitos de esas configuraciones, la metodología de las cargas simplificadas no se puede utilizar, y en su lugar se debe utilizar un modelo de simulaciones o emplearse mediciones de carga. [16]

Las configuraciones de los aerogeneradores, en las cuales se puede utilizar la metodología de las cargas simplificadas, deben cumplir todos los requisitos siguientes:

- Eje horizontal;
- Rotor del tipo hélice de dos palas o más;
- Palas en voladizo;
- Movimiento coordinado de las palas (sin paso de ángulo o cono independiente y no coordinado); y
- Buje rígido (sin cabeceo ni buje articulado).

La configuración del aerogenerador puede utilizar un rotor a barlovento o a sotavento de la torre; puede operar a velocidad constante o variable; puede disponer de mecanismos de cambio de ángulo de paso activo o pasivo (a condición de que el mecanismo de control de paso coordine las palas simultáneamente), así como disponer de paso fijo; y puede plegar el rotor en el eje horizontal, vertical o en ejes intermedios o no disponer de sistema de plegado de rotor. [16]

El modelo de carga simplificado como en este apartado utiliza los siguientes parámetros de entrada:

- Velocidad de rotación de diseño,  $\eta_{design}$ ;
- Velocidad de viento de diseño,  $V_{design}$ ;
- Par en el eje de diseño,  $Q_{design}$ ;
- Velocidad de orientación máxima,  $\omega_{yaw\ máx}$ ; y
- Velocidad de rotación máxima,  $\eta_{máx}$ .

Además, la relación de velocidad de diseño en punta de la pala se define como:

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{hub}} = \frac{\Omega R}{V_{hub}} \rightarrow \lambda_{design} = \frac{R\pi\eta_{design}}{30 V_{design}} \quad (68)$$

$$\Omega_n = \frac{\pi n}{30} \quad (69)$$

### 2.1.5 Cálculo de las hipótesis de carga a aplicar

Para este trabajo solo aplicaremos la hipótesis A, E y H (Tabla 1). Dichas hipótesis solo serán aplicadas al aspa en cuestión, por lo tanto, no aplicaremos ni calcularemos las cargas y momentos en el eje. Esto es porque en el presente trabajo se busca comprobar la integridad estructural del aspa y proponer una metodología de ensayos estructurales para aspas de doble raíz, el eje por ahora no nos interesa.

#### 2.1.5.1 Hipótesis A: operación normal

La carga de diseño para “operación normal” es una carga de fatiga. La hipótesis de carga asume una carga de fatiga de rango constante para la pala.

Los cálculos de las cargas para la hipótesis A se muestran a continuación:

$$\Delta F_{zB} = 2m_B R_{cog} \omega_{n,design}^2 = 2(90 \text{ kg})(0.917 \text{ m})(8.58 \text{ rad/s})^2 = \mathbf{12151.1229 \text{ N}}$$

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{design}}{B} + 2m_B g R_{cog} = 142 \text{ N-m/3} + 2(90 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)(0.917 \text{ m}) = \mathbf{1666.5719}$$

**N-m**

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B} = \frac{8(142 \text{ N-m})}{3} = \mathbf{378.6667 \text{ N-m}}$$

#### 2.1.5.2 Hipótesis E: velocidad máxima del rotor

La carga debida a la fuerza centrífuga en la raíz de la pala  $F_{zB}$  se calcula como sigue:

$$F_{zB} = m_B R_{cog} \omega_{n,máx}^2 = (90 \text{ kg})(0.917 \text{ m})(27.4365 \text{ rad/s})^2 = \mathbf{62125 \text{ N}}$$

#### 2.1.5.3 Hipótesis H: carga extrema del viento

En esta hipótesis de carga, el aerogenerador funciona de la manera prevista en el diseño para velocidades de viento extremas. Las cargas deben calcularse tomando la velocidad máxima registrada en los últimos 50 años,  $V_{e50}$ : [16]

$$M_{yB} = \frac{C_D}{4} \rho V_{e50}^2 A_{projB} R = \frac{1.5}{4} (0.959 \text{ kg/m}^3) (35 \text{ m/s})^2 (1.45 \text{ m}^2) (4.65 \text{ m}) = \mathbf{2970.345 \text{ N-m}}$$

## CAPÍTULO III. SIMULACIÓN DE LAS HIPÓTESIS DE CARGA EN ASPA DE DOBLE RAÍZ

### 3.1 Elemento finito: teoría general

El método de elementos finitos, es un procedimiento numérico usado para obtener la solución a un largo número de problemas en ingeniería que involucran esfuerzos mecánicos, transferencia de calor, flujo de fluidos, electromagnetismo, etc. En general, los problemas de ingeniería son modelos matemáticos de fenómenos físicos. Los modelos matemáticos son ecuaciones diferenciales con un conjunto de condiciones de frontera y condiciones iniciales. [17]

En el método de elementos finitos, la región de solución es una construcción más pequeña llamada elemento, cada elemento se conecta mediante un nodo. [18]

Los métodos matriciales para la solución de las ecuaciones son una herramienta para simplificar la solución de la ecuación de rigidez global. Una matriz es un arreglo rectangular de filas y columnas que a menudo se usan para resolver sistemas ecuaciones algebraicas, como se muestra a continuación: [19]

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (70)$$

donde  $\{F\}$  se denomina vector columna o vector de fuerza y está compuesto por todas las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo sólido. El vector  $\{u\}$  es denominado vector de desplazamientos nodales y representa los desplazamientos que sufren los nodos del modelo, y,  $[K]$  es la matriz de rigidez del sistema. [20]

### 3.2 Composición de materiales del aspa

La simulación se realizará con la ayuda de Ansys ACP 19.0, para lo cual utilizaremos un modelo de un aspa de doble raíz, el cual se aprecia en la siguiente figura:

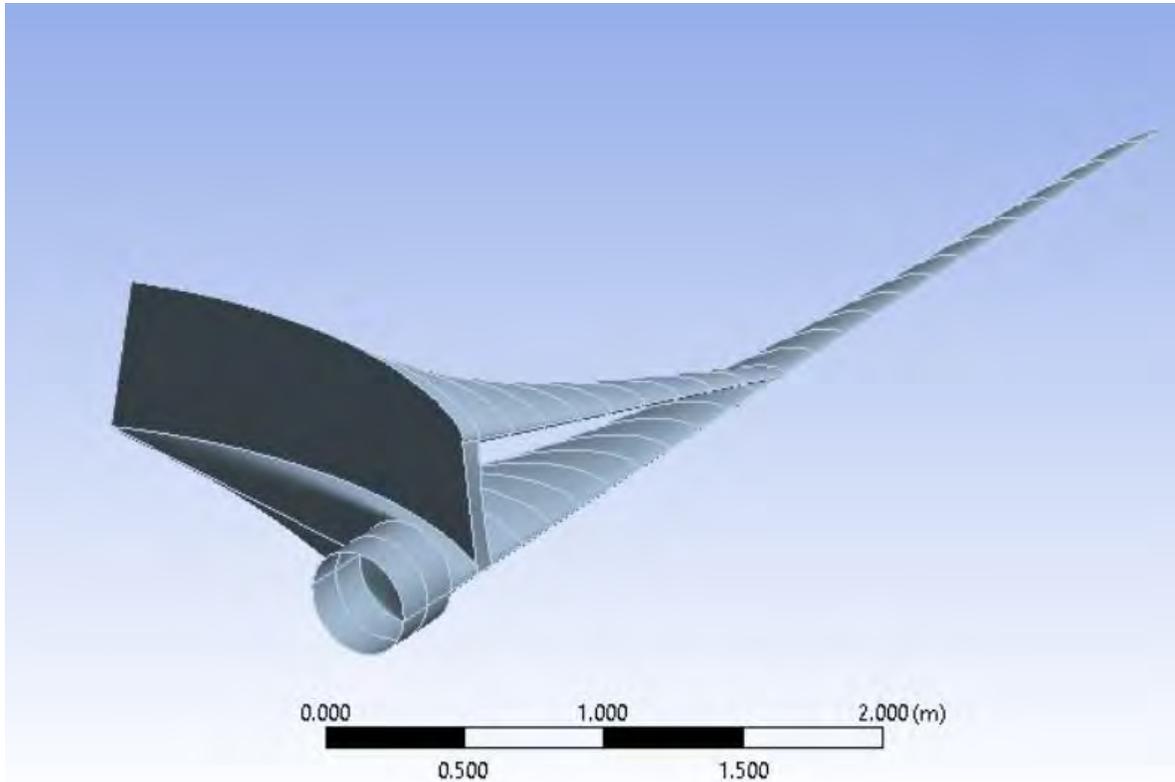


Imagen 19.- Aspa de doble raíz.

El aspa está fabricada con varias capas de material compuesto, fibra de vidrio/Epoxi.

Se entiende por material compuesto aquel formado por dos o más componentes no solubles, de forma que las propiedades obtenidas en el material final sean superiores que las que tendrían dichos materiales utilizados de manera aislada. Algunas de estas cualidades son: dureza, rigidez, resistencia, resistencia a la corrosión, peso, vida a fatiga, conductividad térmica, entre otras. Al componente que proporciona la mayor parte de las propiedades mecánicas se le denomina refuerzo mientras que al material continuo que embebe matriz, siendo la función de este último la protección y la transferencia de esfuerzos principalmente (imagen 20).  
[21]

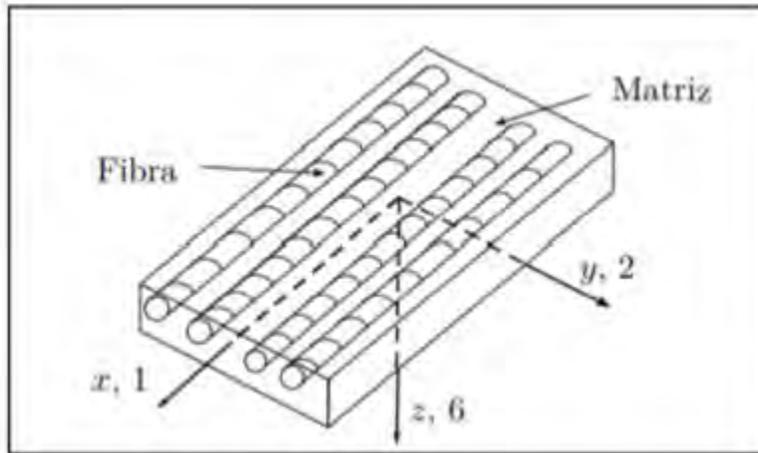


Imagen 20.- Lámina reforzada unidireccional con ejes locales x-y-z y ejes globales 1-2-6. [21]

Los materiales compuestos, presentan dos problemas principales, el primero surge de la complejidad de las piezas y tamaño ya que dificulta su fabricación. Los equipos necesarios son muy específicos encareciendo el coste. El segundo problema, está dado por la anisotropía del material compuesto ya que resulta complejo el cálculo exacto de la rotura de la pieza. Para reducir dicha anisotropía en el plano, se recurre al proceso de laminación. Este proceso constituye el apilamiento de sucesivas capas con distintas orientaciones del material compuesto de fibras largas con una perfecta adherencia entre sí. El objetivo de este proceso es obtener, tras la aplicación de sucesivas láminas orientadas de manera óptima, unas características preestablecidas por el fabricante. Hay que destacar que la rigidez específica en una de las direcciones se reduce a medida que se añaden láminas de material en otras direcciones. Los laminados son caracterizados por sus excelentes propiedades en el plano, destacando su comportamiento a tracción y a compresión (aunque ésta última en menor medida) en la dirección de las fibras (imagen 21). No obstante, debido a la falta de refuerzo en la dirección normal, la resistencia transversal de un laminado es muy reducida. [21]

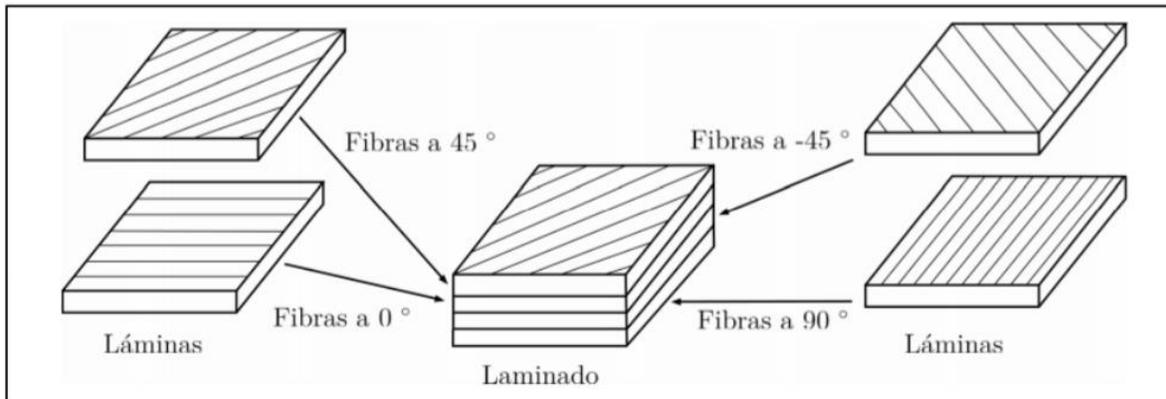


Imagen 21.- Esquema de la composición de un laminado. [21]

### 3.3 Criterios de fallo en materiales compuestos

Hay varias maneras de definir el concepto de fallo, la más obvia cuando existe una separación completa o una sola fractura. Sin embargo, una definición más general sería “cuando el componente ya no puede cumplir la función para la que fue diseñado”. Esta definición, incluye tanto la fractura total como también una deformación o deflexión excesiva o la formación de grietas. Un buen diseño requiere el uso eficiente y seguro de los materiales y es necesario desarrollar teorías para comparar el estado de tensión con los criterios de fallo. En este capítulo, se exponen las teorías de fallo y su aplicación suele ser validada en la experimentación. En un laminado, la resistencia se relaciona con la de cada lámina individual. Lo que permite un método simple y económico para determinar la resistencia de este laminado. Varias teorías han sido desarrolladas para el estudio del fallo de una lámina cuyas fibras están orientadas, que se basan generalmente en las resistencias normales y a cortadura de la lámina unidireccional. En una lámina de material compuesto, las teorías de fallo no se basan en las tensiones principales y por cortadura. Por el contrario, se basan en las tensiones en la dirección de la fibra o ejes locales, porque la lámina es ortotrópica y sus propiedades son distintas a diferentes ángulos. En el caso de una lámina unidireccional, hay dos ejes materiales: uno paralelo a la dirección de las fibras y otro perpendicular a ellas. Por lo tanto, hay 4 parámetros de resistencia normal, para tracción  $X_T$ ,  $Y_T$  y para

compresión XC, YC, en cada una de las 2 direcciones de los ejes materiales. El quinto parámetro es la resistencia a cortadura de una lámina unidireccional S. Los parámetros de resistencia no se pueden transformar tensorialmente directamente para una lámina cuyas fibras están orientadas. Las teorías de rotura o fallo se basan en encontrar primero las tensiones en los ejes locales y luego usar estos 5 parámetros de resistencia para saber si la lámina unidireccional ha fallado o no.

Los criterios de fallo en un material compuesto pueden dividirse en: Criterios de límite, Criterios interactivos y Criterios de modo.

El criterio de Tsai-Wu, es uno de los más relevantes en la categoría de criterios interactivos. Pretende generalizar el criterio de fallo de Tsai-Hill distinguiendo entre las resistencias a compresión de las de tracción. Este criterio está basado en el criterio de plastificación de materiales anisótropos de Hill, que a su vez está basado en el criterio de Von-Mises para materiales isótropos. El criterio de Tsai-Wu es uno de los más utilizados en códigos de elementos finitos comerciales, por ejemplo, en ANSYS lo implementa, debido a su simplicidad y a que predice satisfactoriamente el fallo de los materiales compuestos en múltiples casos, ver tabla 2. [21]

- En 2D:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2 F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1$$

- En 3D:

$$F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} [\sigma_2^2 + \sigma_3^2] + F_{44} \sigma_4^2 + F_{66} [\sigma_5^2 + \sigma_6^2] + 2 F_{12} [\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3] + 2 F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + F_1 \sigma_1 + F_2 [\sigma_2 + \sigma_3] = 1$$

$F_{11}$	$F_{22}$	$F_{55}$	$F_{12}$	$F_{23}$	$F_{44}$	$F_1$	$F_2$
$\frac{1}{X_T X_C}$	$\frac{1}{Y_T Y_C}$	$\frac{1}{S^2}$	$F_{12}^* \sqrt{F_{11} F_{22}}$	$F_{13}^* F_{22}$	$2 [F_{22} - F_{23}]$	$\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}$	$\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}$

Tabla 2. Relación entre los coeficientes de Tsai-Wu y las resistencias a fallo. [21]

### **3.4 Simulación en Elemento Finito del modelo aeroelástico**

Para realizar el modelado y la simulación aeroelástica del álabe de doble raíz, se emplea el módulo ACP de ANSYS. ANSYS Composite PrepPost, es un módulo adicional del programa dedicado a modelado de estructuras compuestas en capas. El proceso general de análisis de materiales compuestos en ANSYS ACP consiste en:

1. Desarrollar la geometría del modelo mediante superficies o elementos Shell.
2. Mallar de geometría aplicando cargas y condiciones de frontera.
3. Definir materiales.
4. Importar los modelos en ANSYS Composite PrepPost.
  - a. Definir telas compuestas:
    - i. Tejido: un material y un grosor.
    - ii. Laminado: un conjunto de telas (con orientaciones).
  - b. Definir la orientación del elemento (orientar adecuadamente materiales).
  - c. Definir la secuencia de capas para grupos de elementos.
5. Resolver el modelo.
6. Postprocesar los resultados en ACP: deformaciones, espesores y criterios de falla.

Con relación al material empleado en la simulación, se toman los valores de Barnes et al. [22], donde los autores realizan un análisis estructural a álabes para alta y baja velocidad de viento. Las propiedades de los materiales laminados se enlistan en la tabla 3. Dicha tabla, muestra los valores de las propiedades mecánicas de la lámina de fibra de vidrio bidireccional /epoxi a  $\pm 45^\circ$  y de la lámina unidireccional de fibra de vidrio/epoxi.

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

Tabla 3. Propiedades de los materiales de las láminas de fibra de vidrio/epoxi. [22]

Los tipos de láminas, sus espesores y número se basan tomando como referencia a Barnes et al. [22]. La imagen 22, muestra las láminas de fibra de vidrio/epoxi, aplicadas en la manufactura del álabe de doble raíz. Como se aprecia, el álabe se dividió en tres zonas que definen su número de láminas. La zona de raíz (en rojo) está definida por nueve capas incluyendo la capa de gel coat, por su parte la zona media (en amarillo) está definida por siete capas incluyendo la capa de gel coat, finalmente la zona de punta (en verde) está definida por cinco capas incluyendo la capa de gel coat.

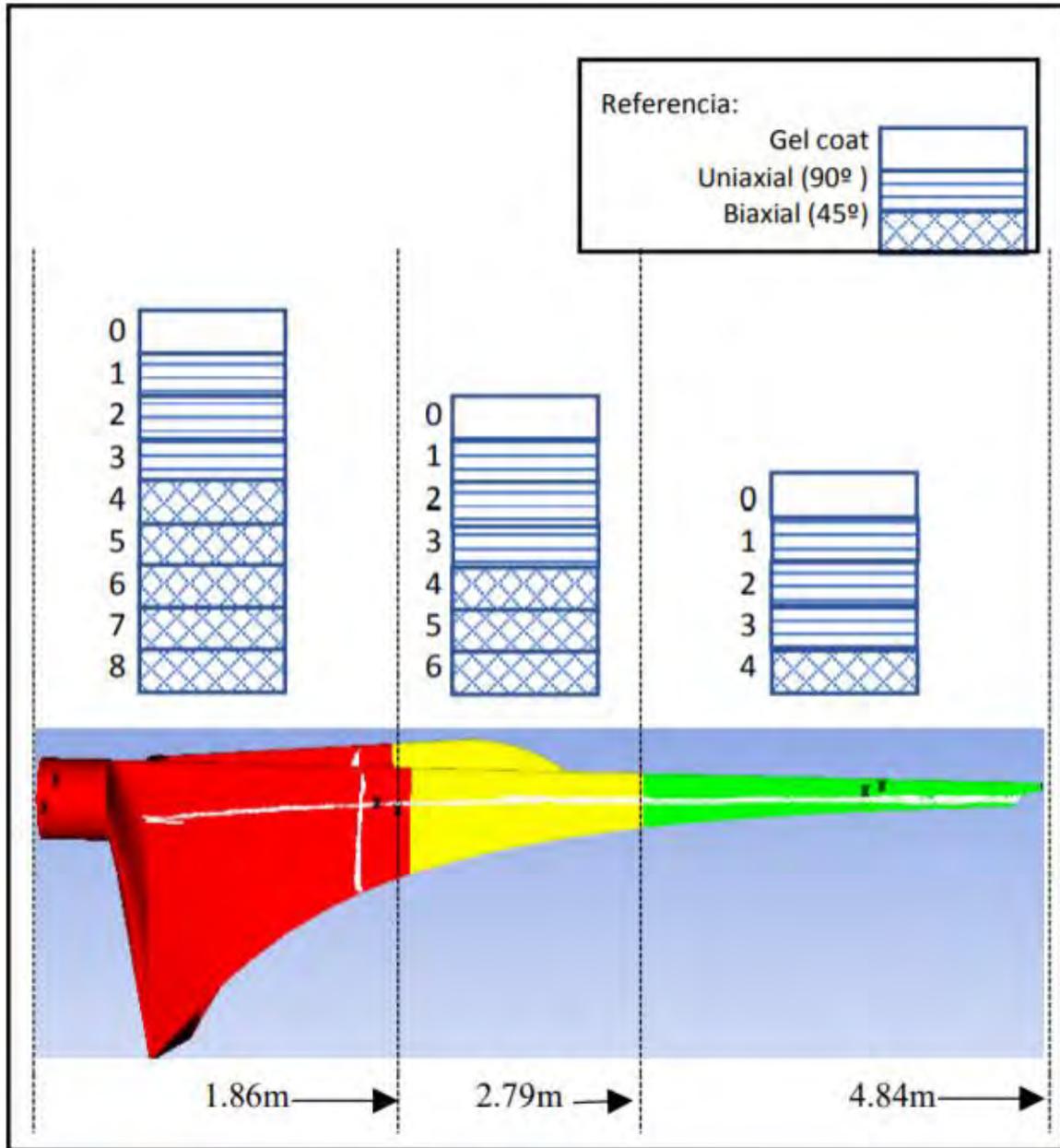


Imagen 22.- Distribución de las láminas de fibra de vidrio/epoxi en álabe de doble raíz. [4]

### 3.5 Mallado y condiciones de frontera

El mallado consiste en dividir la geometría o el dominio en sub elementos más pequeños, al aplicar el mallado al aspa queda como se muestra a continuación:

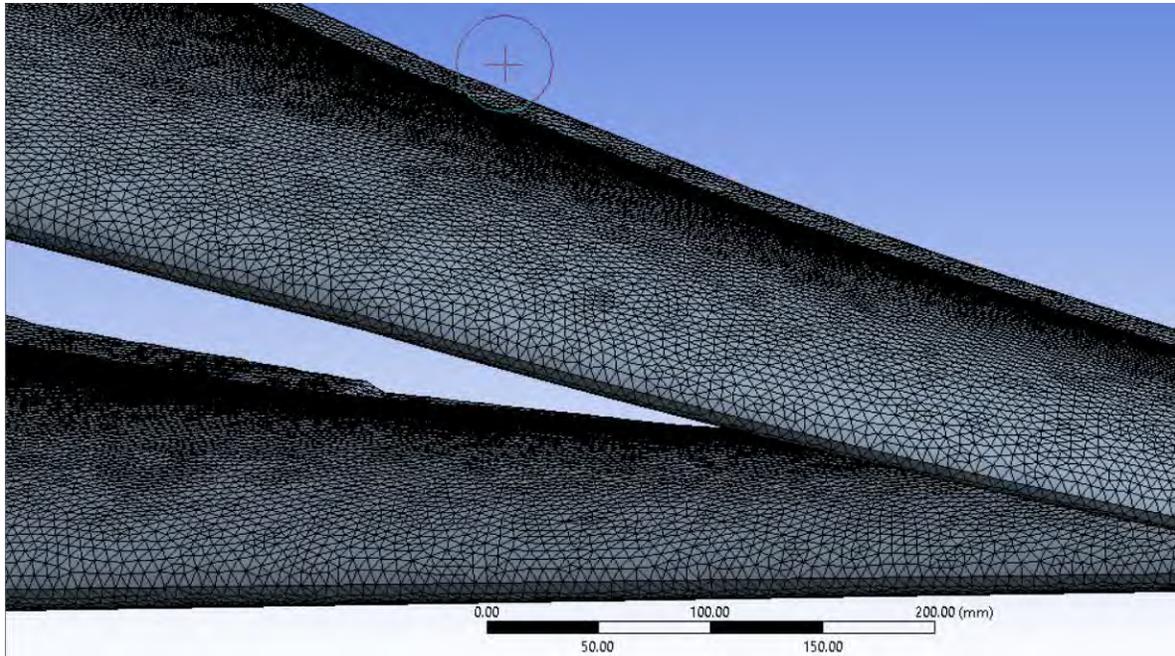


Imagen 23.- Mallado del aspa.

Las condiciones de frontera consistirán en aplicar las hipótesis de carga agregando una condición de empotramiento en la raíz del aspa. Para fines prácticos, las hipótesis de carga que impliquen momentos en el aspa, serán transformadas a fuerzas en el mismo eje, utilizando la distancia a la raíz que en este caso es de 3.25 metros. En la tabla 4 se presenta un resumen de las condiciones de frontera de las 3 hipótesis de carga.

Hipótesis de carga	Momento en x (Momento Edgewise) N-m	Momento en y (Momento Flapwise) N-m	Fuerza en z (centrífuga) N
A	1666.5719	378.6667	12151.1229
E	n/a	n/a	62125
H	n/a	2970.345	n/a

Tabla 4. Resumen de las condiciones de carga.

n/a: no aplica

### 3.5.1 Criterios de calidad de malla

A la hora de simular un fenómeno mediante elemento finito, es importante contar con un mallado de calidad, ya que la exactitud y el tiempo de solución son de suma importancia. Un mal mallado nos puede llevar a que nuestro modelo nunca llegue a la convergencia, resultados alejados de la realidad que se traducen en una mala interpretación del fenómeno físico. [23]

A continuación, se describen brevemente los parámetros más importantes a considerar para un buen mallado:

- **Calidad de elemento:** se basa en la relación del volumen a la suma del cuadrado de las longitudes de borde para los elementos 2D, o la raíz cuadrada. [23]
- **Relación de aspecto:** es la medida del estiramiento de un elemento. Se calcula como la relación entre el valor máximo y el valor mínimo de cualquiera de las siguientes distancias: las distancias normales entre el centroide de la celda y los centroides de la cara, y las distancias entre el centroide de la celda y los nodos. [23]
- **Esquinamiento:** determina qué tan cerca de lo ideal (es decir, equilátero o equiangular) está una cara o un elemento. Caras muy esquinadas pueden reducir la exactitud y desestabilizar la exactitud de la solución. Las mallas cuadriláteras optimas son aquellas con ángulos en los vértices próximos a  $90^\circ$  mientras que las mallas triangulares deben tener ángulos próximos a  $60^\circ$ . [23]
- **Calidad ortogonal:** se calcula utilizando el vector normal del borde y el vector desde el centroide de la cara hasta el centroide de cada borde. [23]

A continuación, se muestran los criterios para evaluar los parámetros antes descritos:

Parámetro	Espectro de parámetro de malla
Calidad de elemento	 0 Malo <span style="float: right;">1 Perfecto</span>
Relación de aspecto	 1 Perfecto <span style="float: right;">∞ Malo</span>
Esquinamiento	 0 Perfecto <span style="float: right;">1 Malo</span>
Calidad ortogonal	 0 Malo <span style="float: right;">1 Perfecto</span>

Tabla 5.- Espectro de calidad de los parámetros de malla. [23]

La siguiente tabla muestra los parámetros del mallado del modelo:

Parámetro	Promedio	Calidad
Tamaño de elemento	2.6 mm	-
Nodos	1338349	-
Elementos	2676144	-
Tipo de elemento	Tri3	-
Calidad del elemento	0.96721	Excelente
Relación de aspecto	1.184	Excelente
Esquinamiento	0.04936	Excelente
Calidad ortogonal	0.96966	Excelente

Tabla 6. Características del mallado.

### 3.5.2 Convergencia de mallado

A la hora de hacer una simulación numérica por elemento finito, tenemos que tener en cuenta que, una simulación más precisa requiere de un mayor número de elementos, es decir, una malla más refinada. Sin embargo, esto se ve limitado por

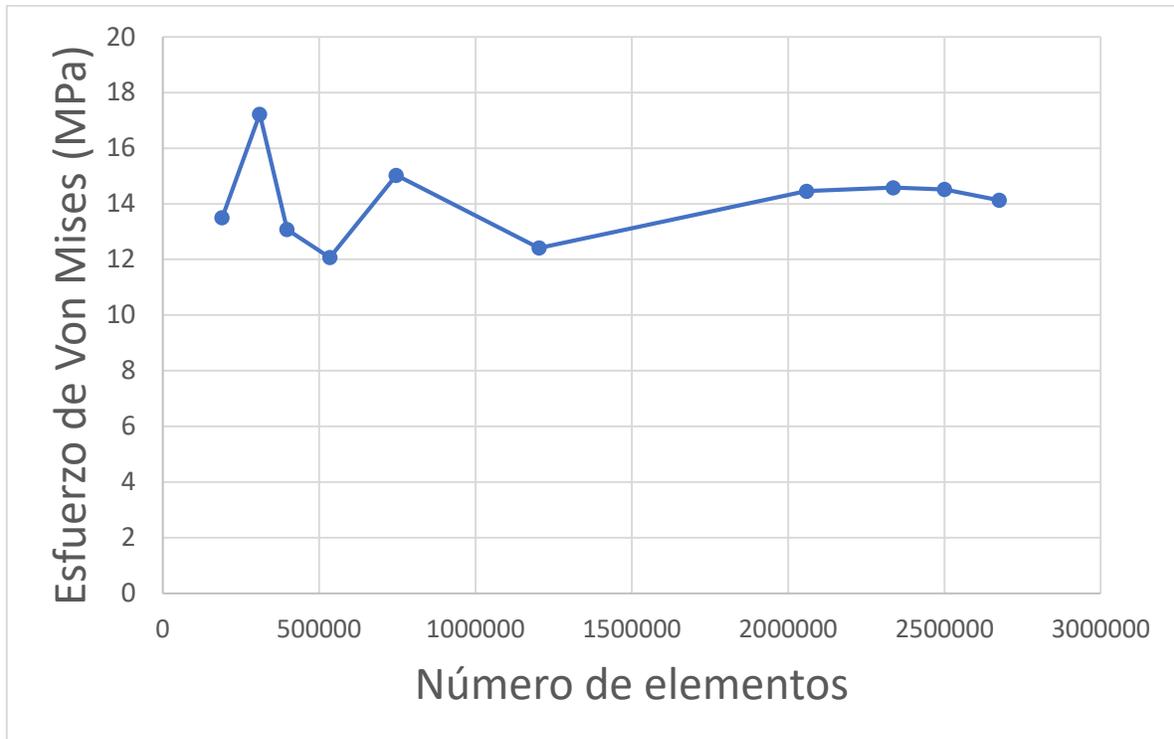
nuestro equipo de cómputo, ya que al ser un mayor número de elementos el tiempo de cálculo incrementa o muchas veces nuestra capacidad computacional no es capaz de resolver para tantos elementos. Para ello es necesario que hagamos un análisis de convergencia de malla, es decir, buscar el punto óptimo entre número de elementos y capacidad computacional.

La siguiente tabla muestra las simulaciones hechas para distintos tamaños de elemento, se dice que la malla ha convergido cuando el porcentaje de variación de tres resultados consecutivos es menor al 6%, esto lo podemos observar para los tamaños de elemento de 2.8 mm, 2.7 mm y 2.6 mm.

Malla	Tamaño de elemento (mm)	Numero de nodos	Número de elementos	Esfuerzo de Von Misses (MPa)	Porcentaje de variación del esfuerzo (%)	Deformación máxima (mm)
I	10	95040	189937	13.502	-	2.6783
II	8	157957	309733	17.222	27.55	2.5871
III	7	198898	397589	13.077	24.05	2.5938
IV	6	267276	534311	12.072	7.68	2.5953
V	5	373463	746639	15.025	24.46	2.5995
VI	4	601903	1203439	12.413	17.38	2.6012
VII	3	1029907	2059327	14.458	16.47	3.954
VIII	2.8	1168541	2336564	14.58	0.84	2.6038
IX	2.7	1250568	2500601	14.517	0.43	2.6045
X	2.6	1338349	2676144	14.129	2.67	2.6046

Tabla 7. Análisis de convergencia de malla.

A continuación, se muestra la gráfica de convergencia de mallado:



Gráfica 1.- Gráfica de convergencia de mallado.

### 3.5.3 Hipótesis A

A continuación, se muestra la fuerza centrífuga para la hipótesis A:

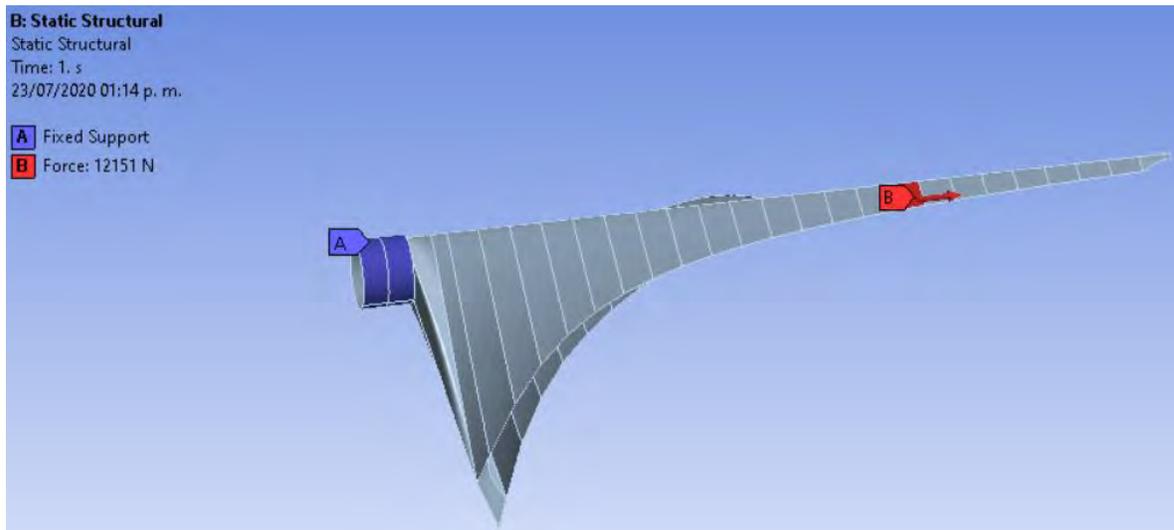


Imagen 24.- Fuerza centrífuga.

Sigue el momento flector Flapwise (eje x):

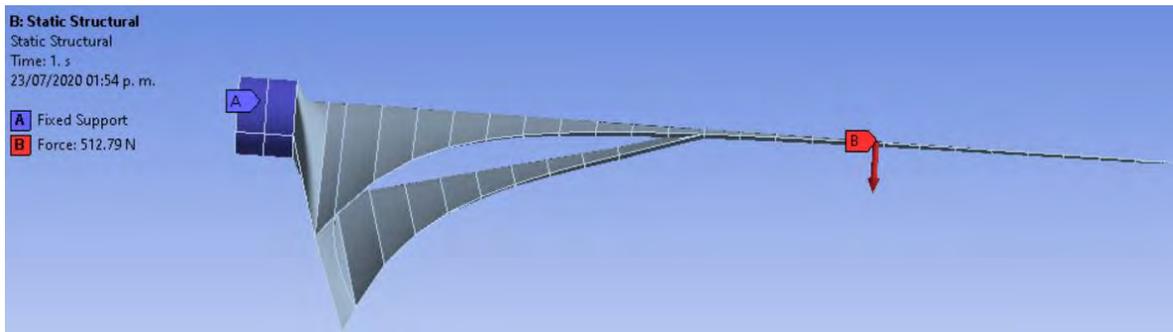


Imagen 25.- Momento flector Flapwise.

Por último, el momento flector Edgewise (eje y):

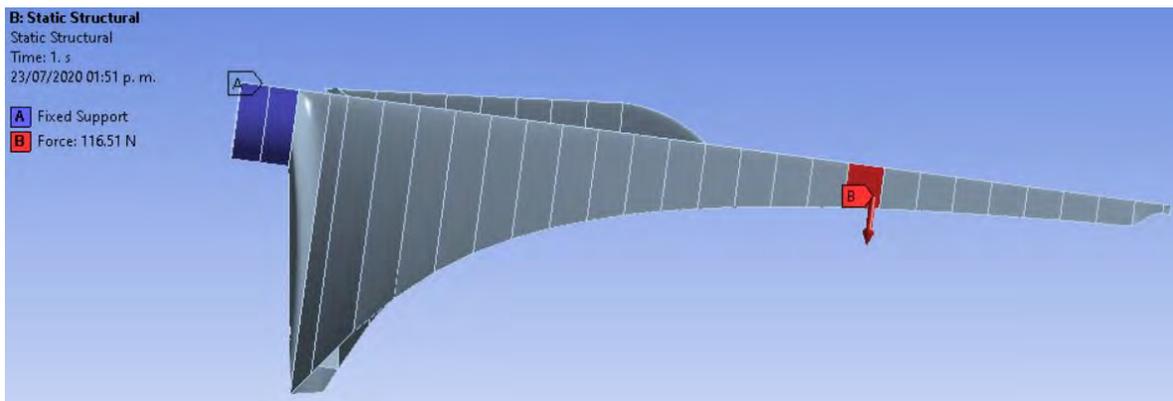


Imagen 26.- Momento flector Edgewise.

### 3.5.4 Hipótesis E

Se aplica la carga debida a la fuerza centrífuga máxima en el eje z:

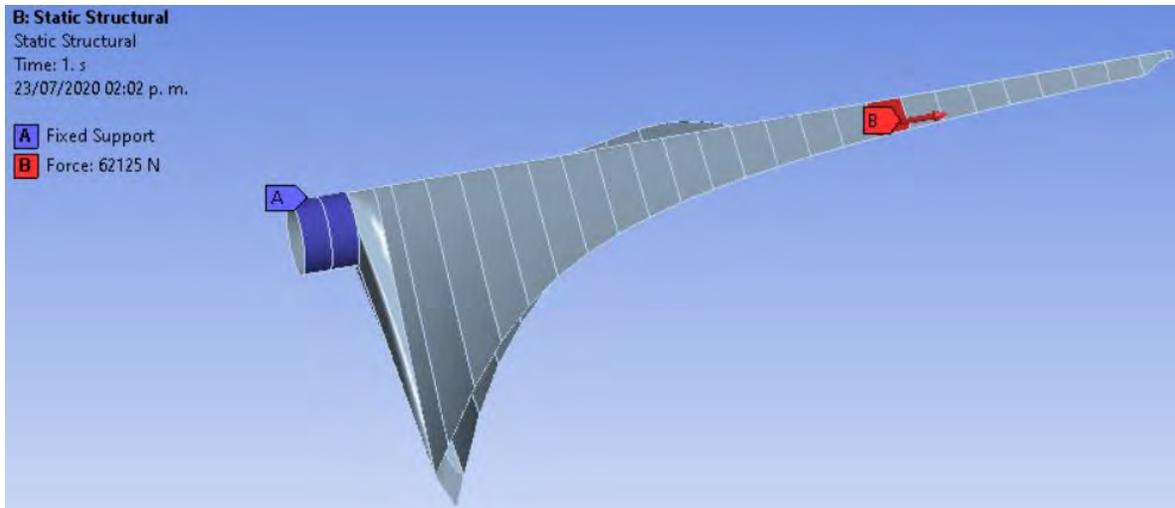


Imagen 27.- Fuerza centrífuga máxima.

### 3.5.5 Hipótesis H

Por último, se aplica el momento flector en Edgewise (eje y):

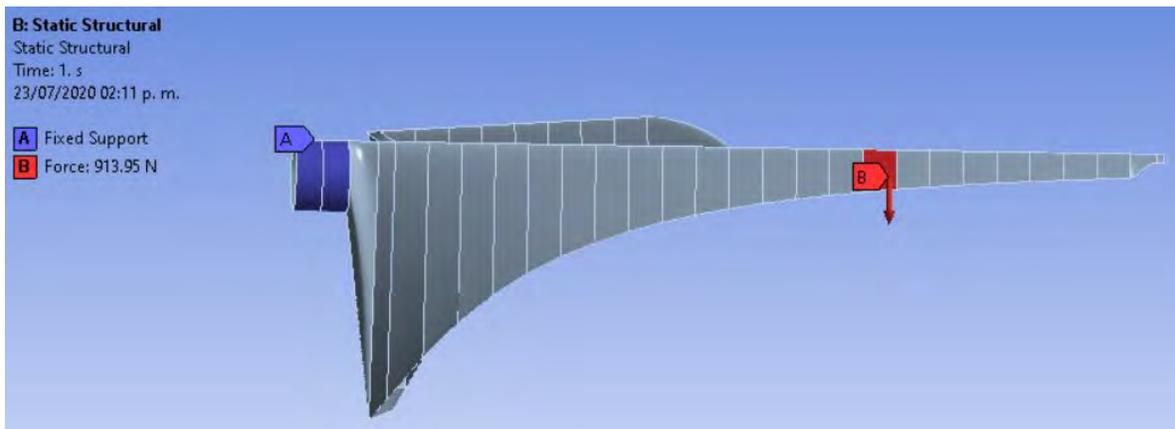
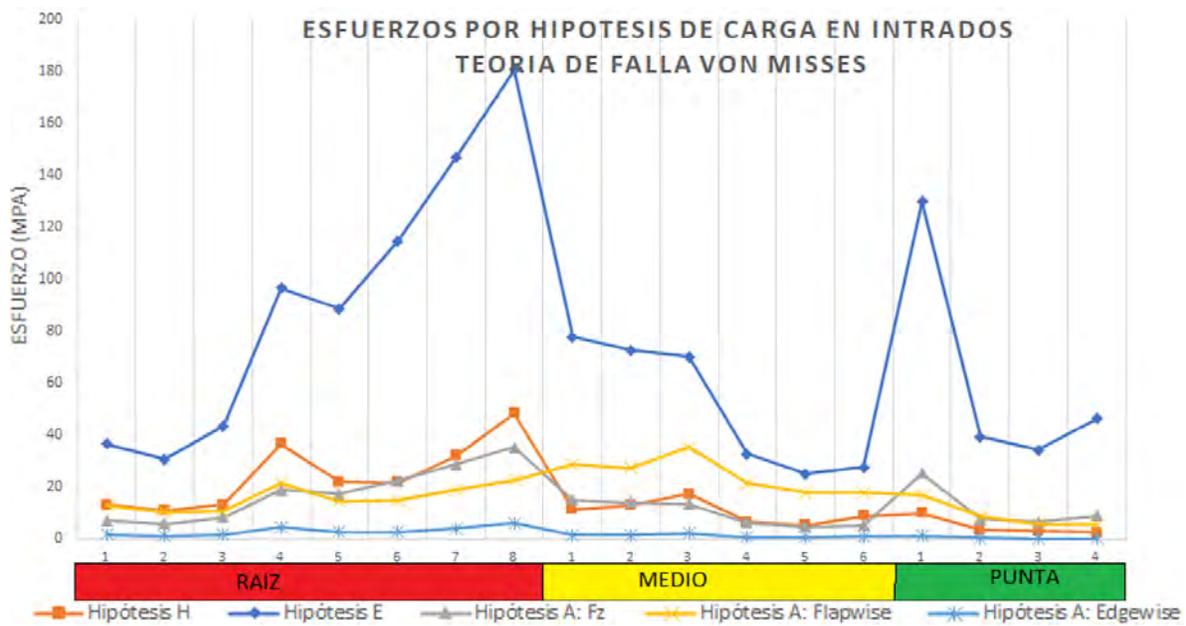


Imagen 28.- Momento flector Edgewise.

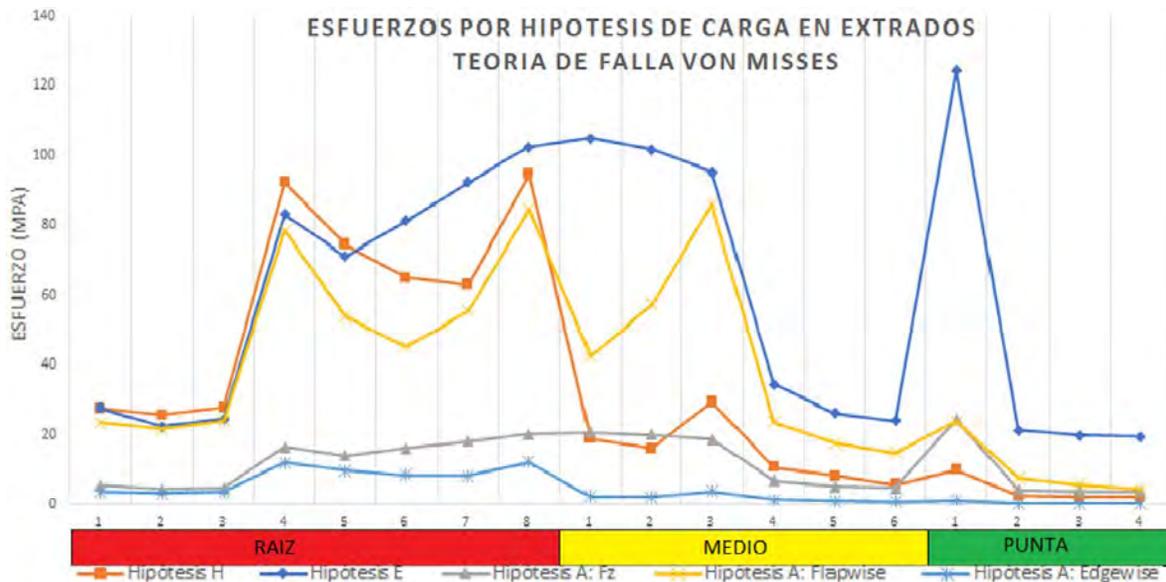
## 3.6 RESULTADOS

Los resultados de la simulación, obtenidos en el software ACP de ANSYS, se exponen en la gráfica 1, en la gráfica se muestra distribución de esfuerzos según la teoría de falla de Von Mises, por lámina y región para cada una de las tres hipótesis de carga en la región del intradós del álabe, mientras que en la gráfica 2 se muestra distribución de esfuerzos según la teoría de falla de Von Mises, por lámina y región

para cada una de las tres hipótesis de carga en la región del extradós del álabe . El lector más o menos avezado en conocimientos de mecánica de materiales, tendrá en este momento la duda si es correcto aplicar la teoría de falla de Von Misses a materiales compuestos. Pues bien, según Castillo [21], es aceptable aplicar la teoría de falla de Von Misses en materiales compuestos siempre y cuando el material se comporte más o menos lineal en la zona elástica en el diagrama esfuerzo-deformación. El material compuesto de fibra de vidrio/Epoxi tiene este tipo de comportamiento lineal.



Gráfica 2.- Distribución de esfuerzos según la teoría de falla de Von-Misses, por lámina y región para cada una de las hipótesis de carga, intradós del álabe.



Gráfica 3.- Distribución de esfuerzos según la teoría de falla de Von-Misses, por lámina y región para cada una de las hipótesis de carga, extradós del álabe.

A continuación, se detallarán los resultados de los esfuerzos máximos de Von-mises y el valor máximo del criterio Tsai-Wu en cada una de las tres zonas del aspa, tanto en intradós como extradós para las 3 hipótesis de carga a aplicar.

### 3.6.1 Hipótesis A: operación normal

#### Resultados para la fuerza centrífuga.

Deformación total:

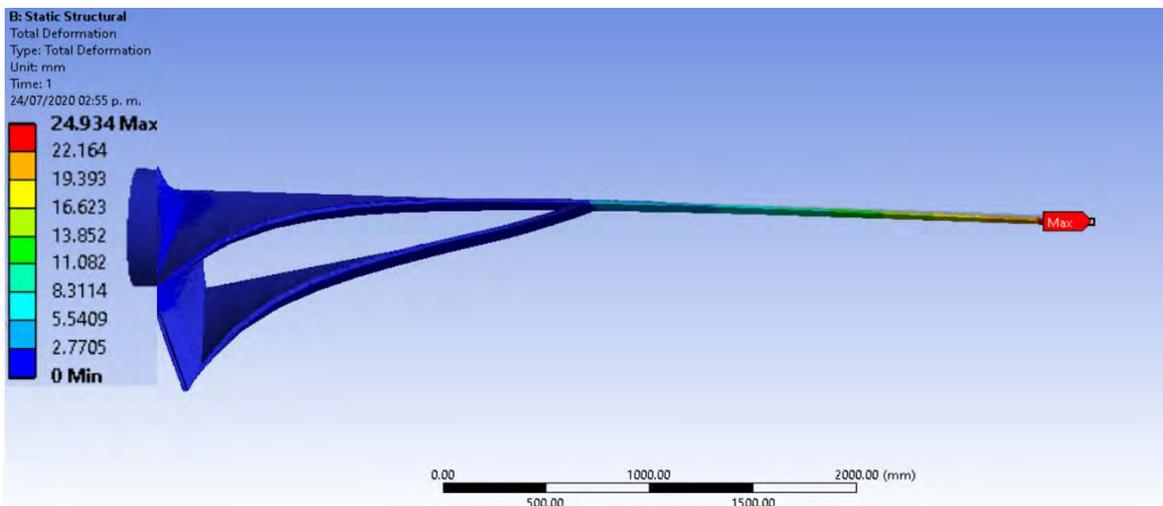


Imagen 29.- Deformación total.

El esfuerzo máximo en el intradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

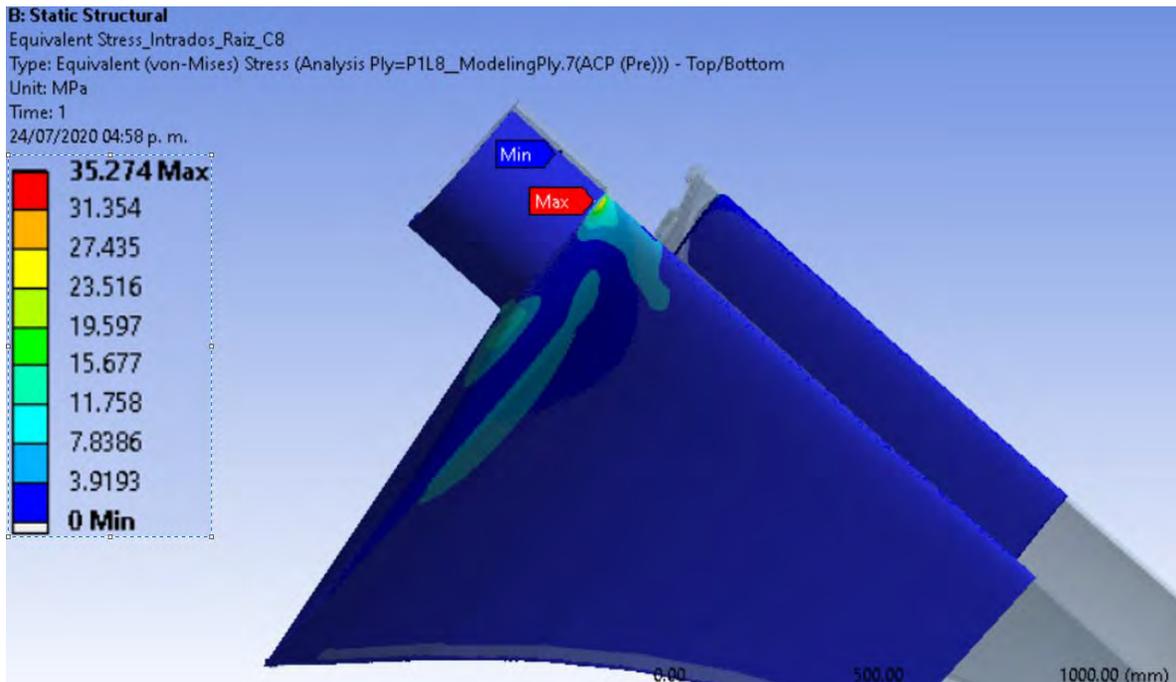


Imagen 30.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el extradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

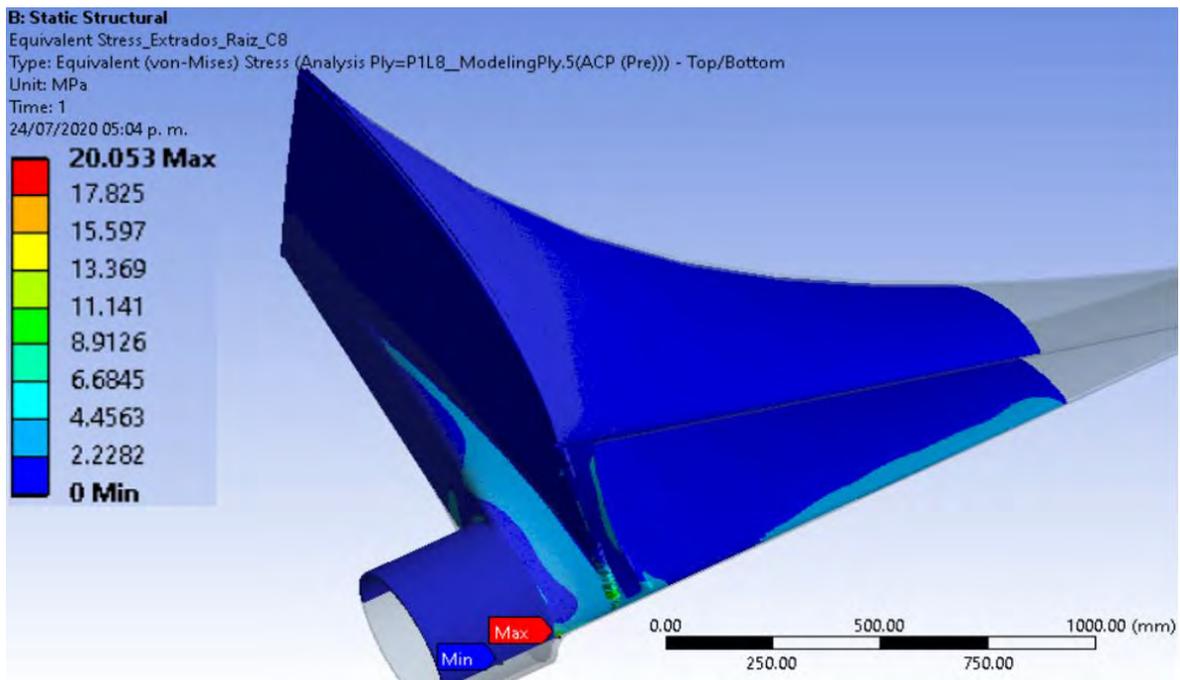


Imagen 31.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el intradós de la zona media, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

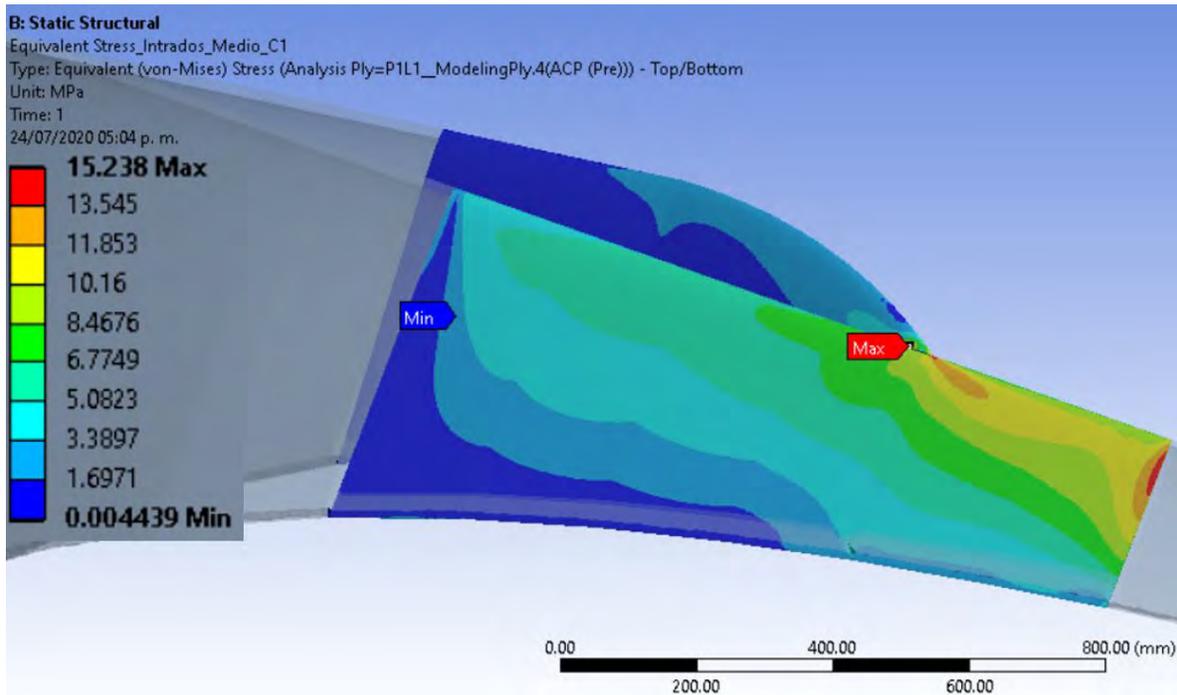


Imagen 32.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el extradós de la zona media, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

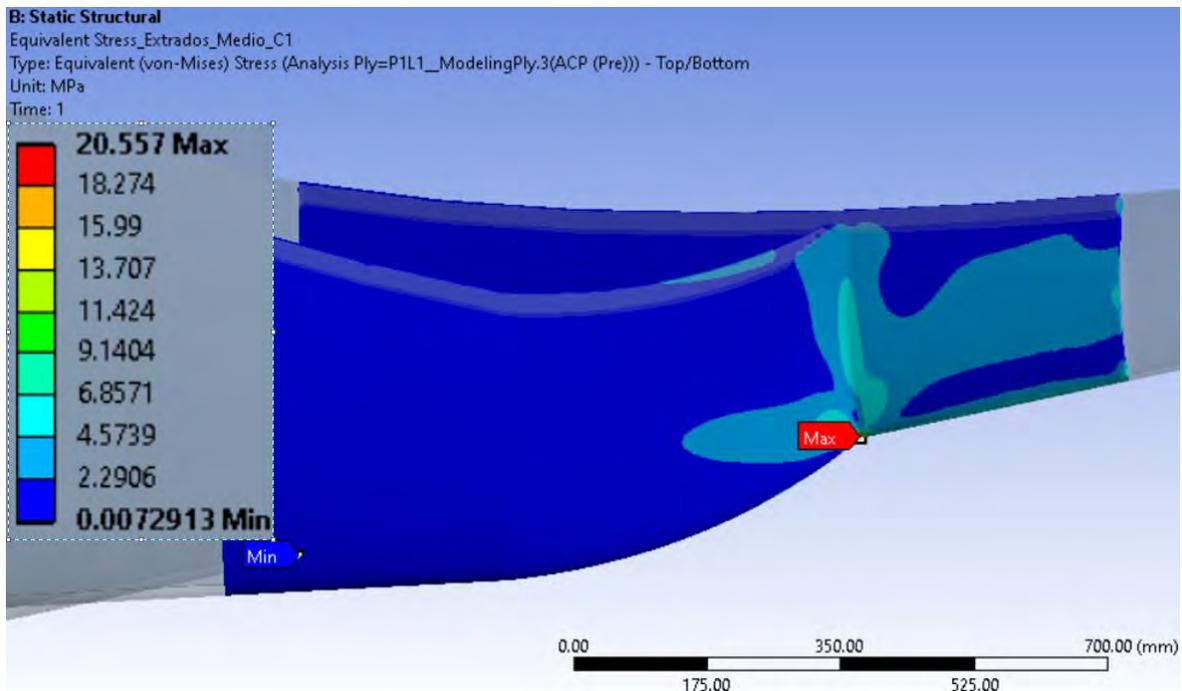


Imagen 33.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el intradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

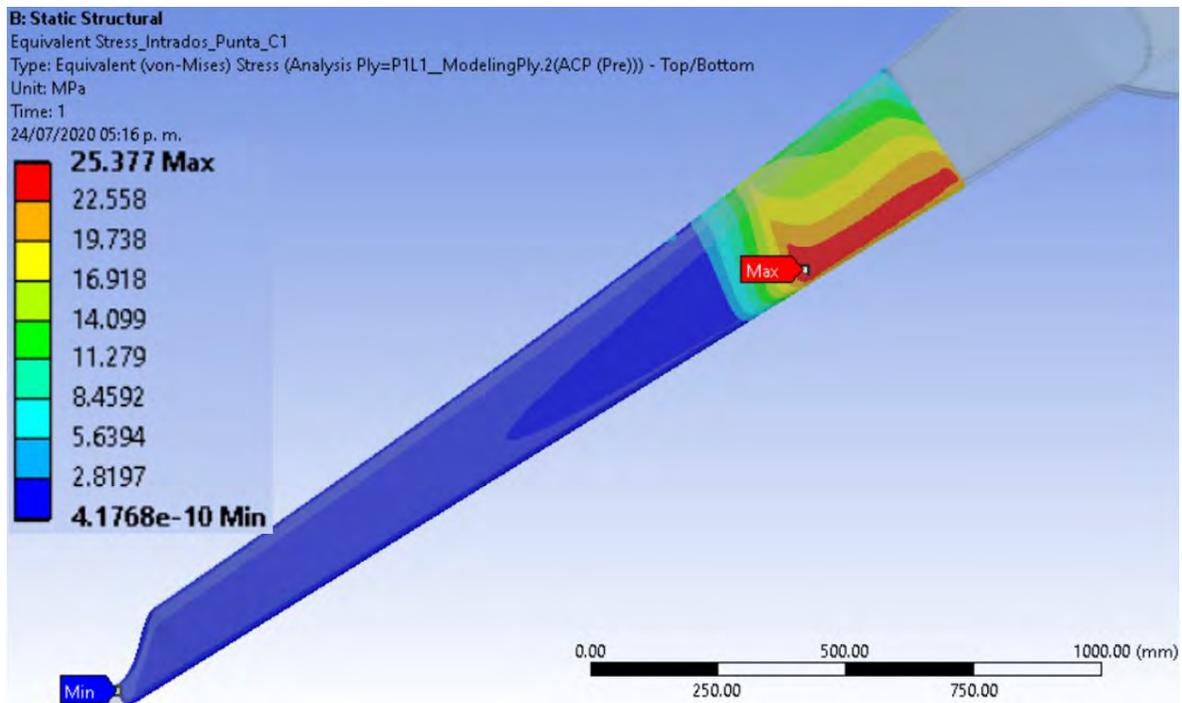


Imagen 34.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta.

El esfuerzo máximo en el extradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

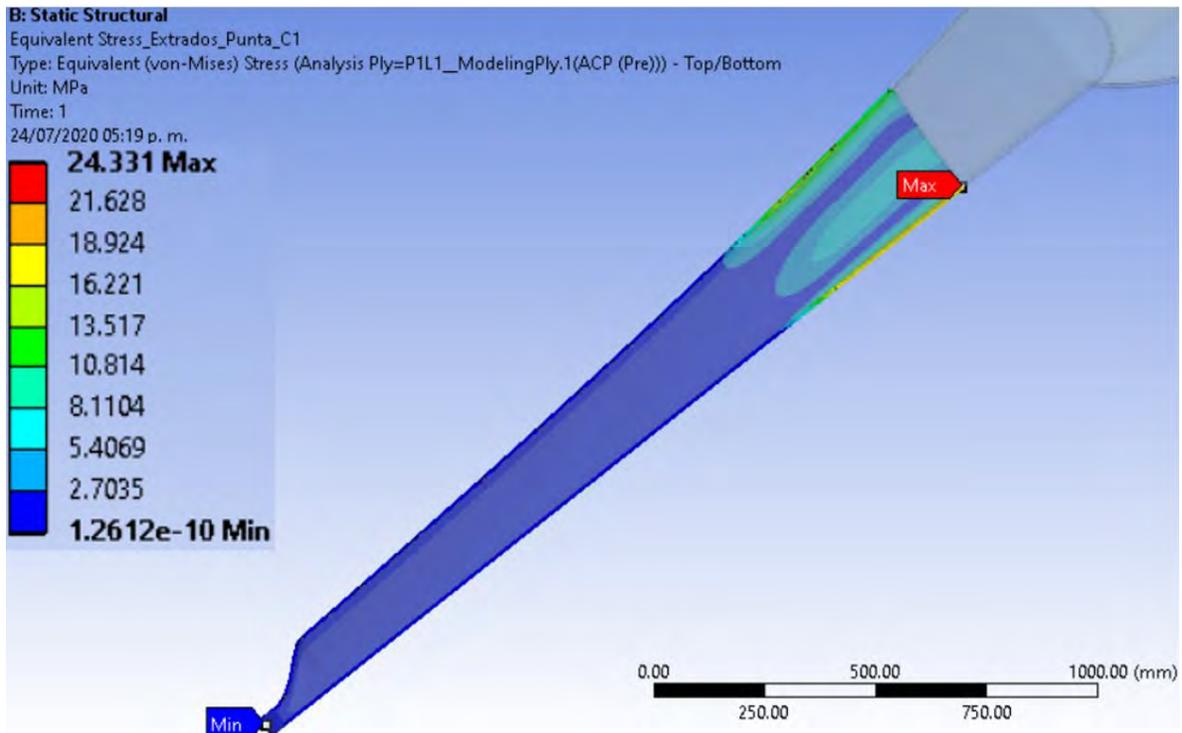


Imagen 35.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta.

Criterio de falla Tsai-Wu máximo: 0.0669, en la zona media.

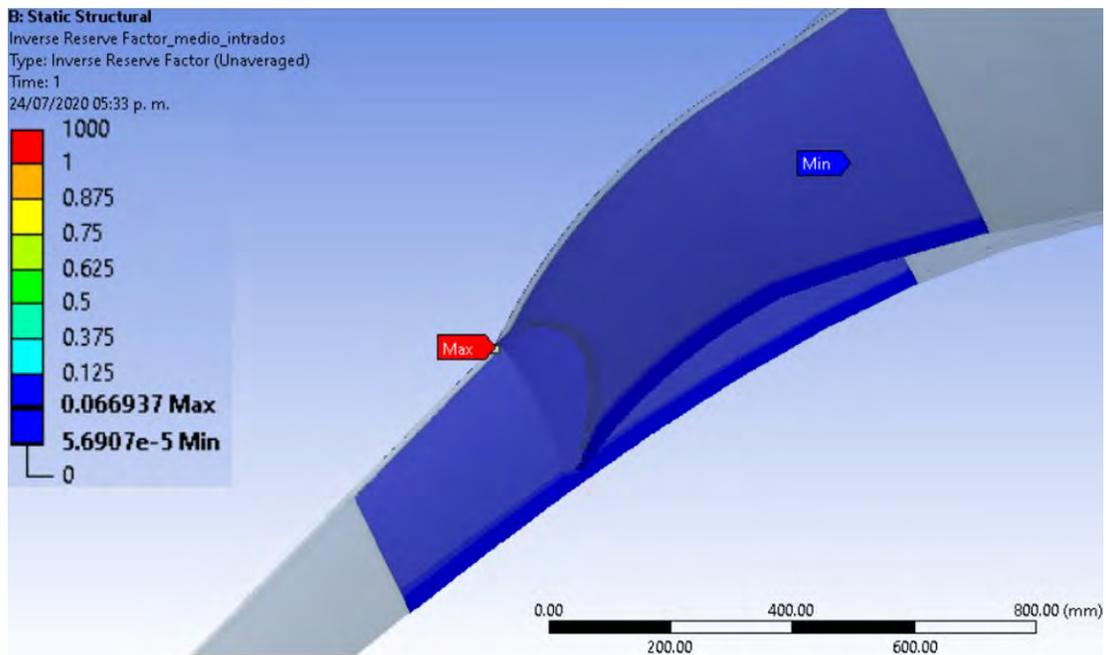


Imagen 36.- Tsai-Wu máximo en zona media.

## Resultados para el momento flector Flapwise (eje x).

Deformación total:

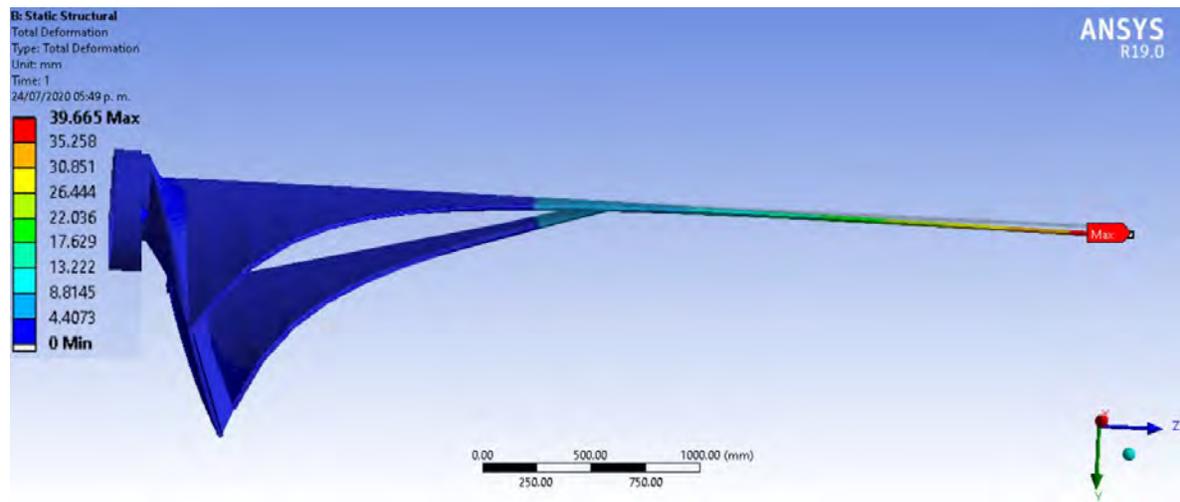


Imagen 37.- Deformación total.

El esfuerzo máximo en el intradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

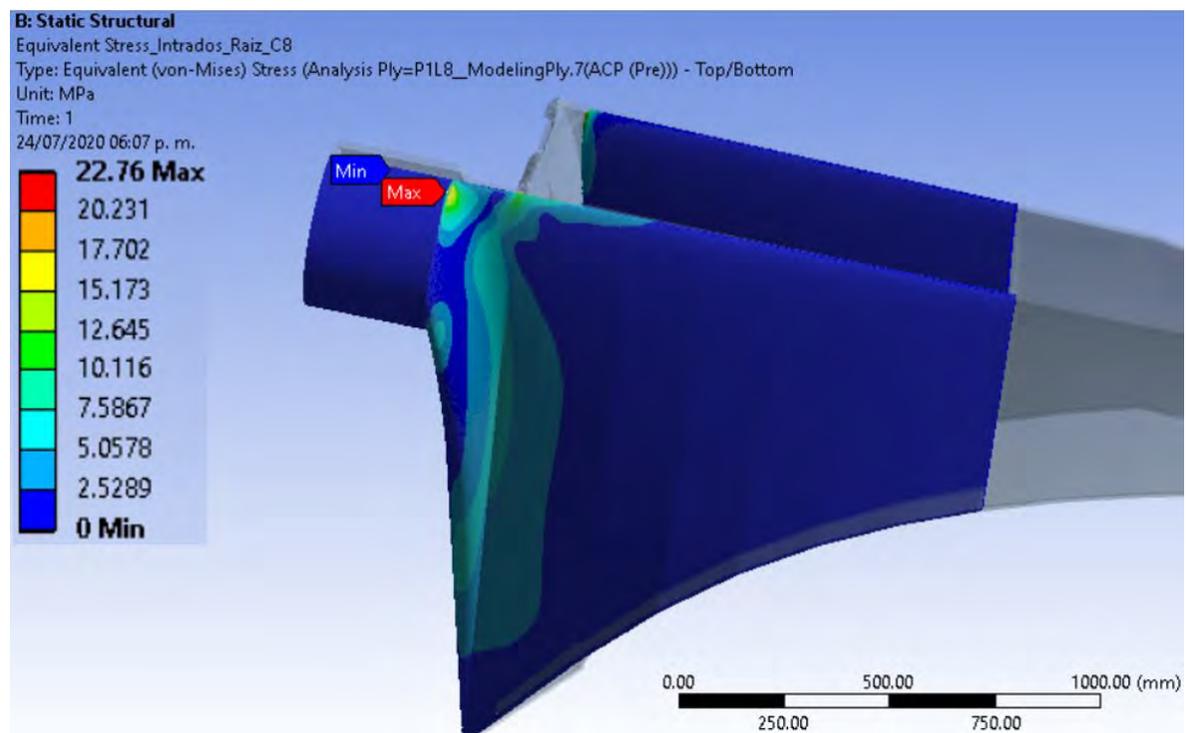


Imagen 38.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el extradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

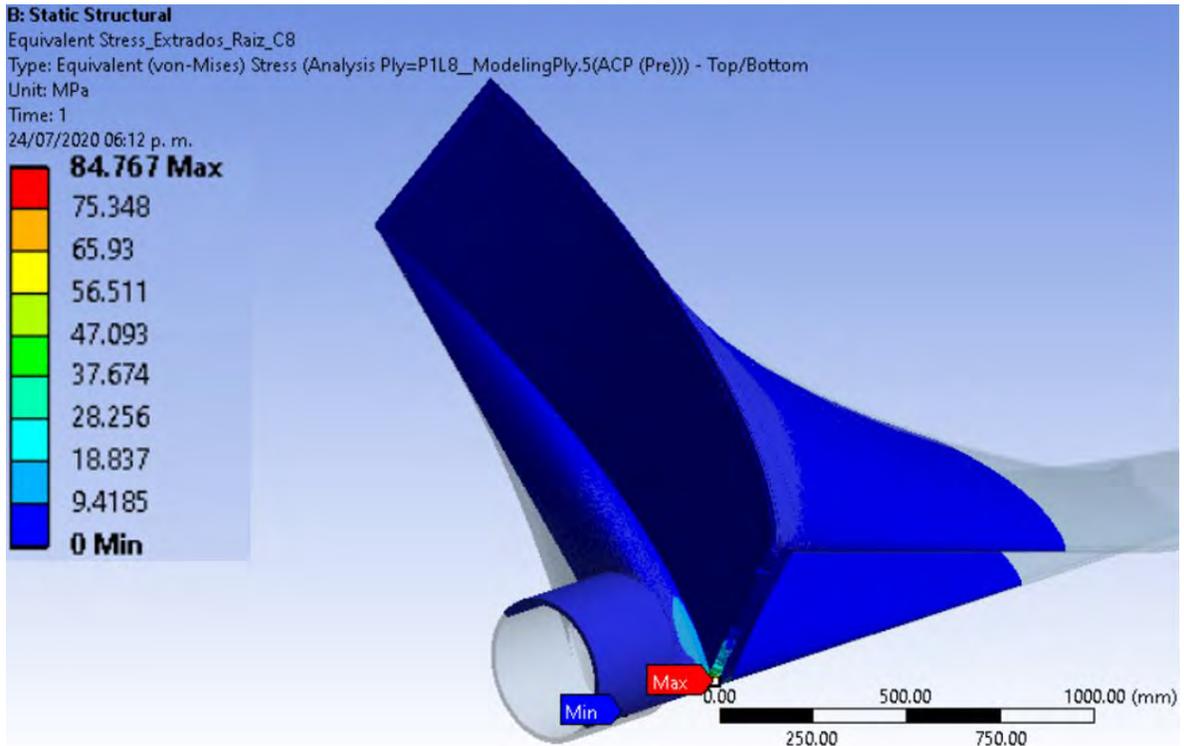


Imagen 39.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el intradós de la zona media, se presentó en la lámina 3, unidireccional a 90°:

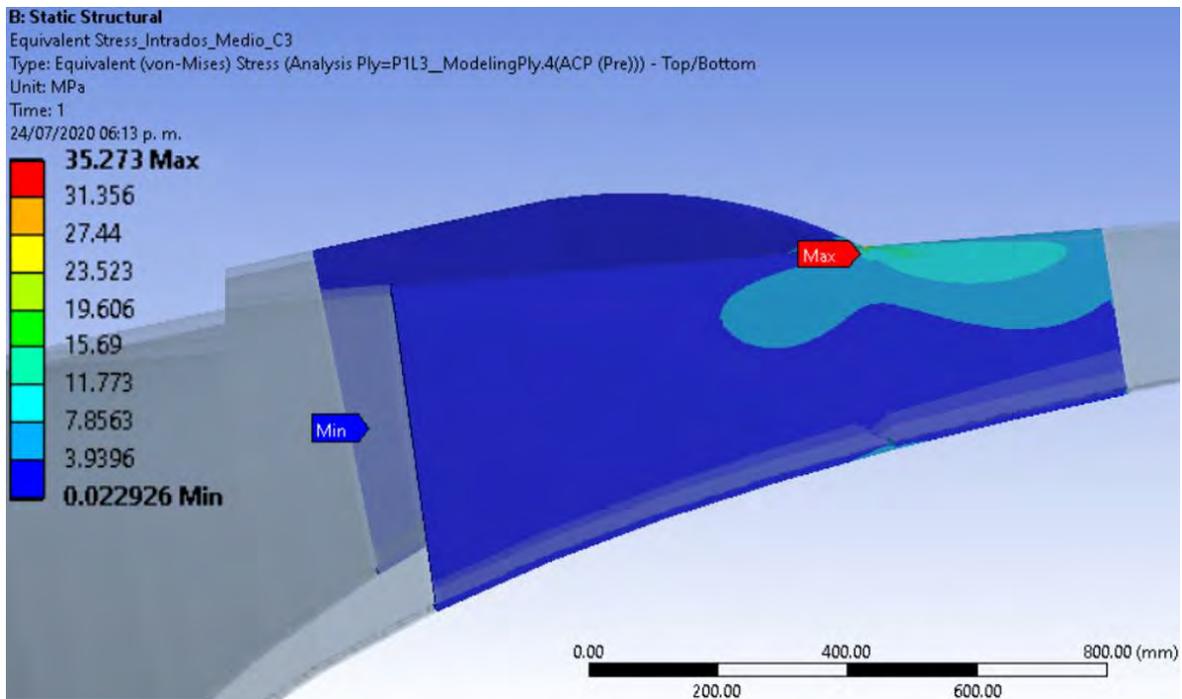


Imagen 40.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el extradós de la zona media, se presentó en la lámina 3, unidireccional a  $90^\circ$ :

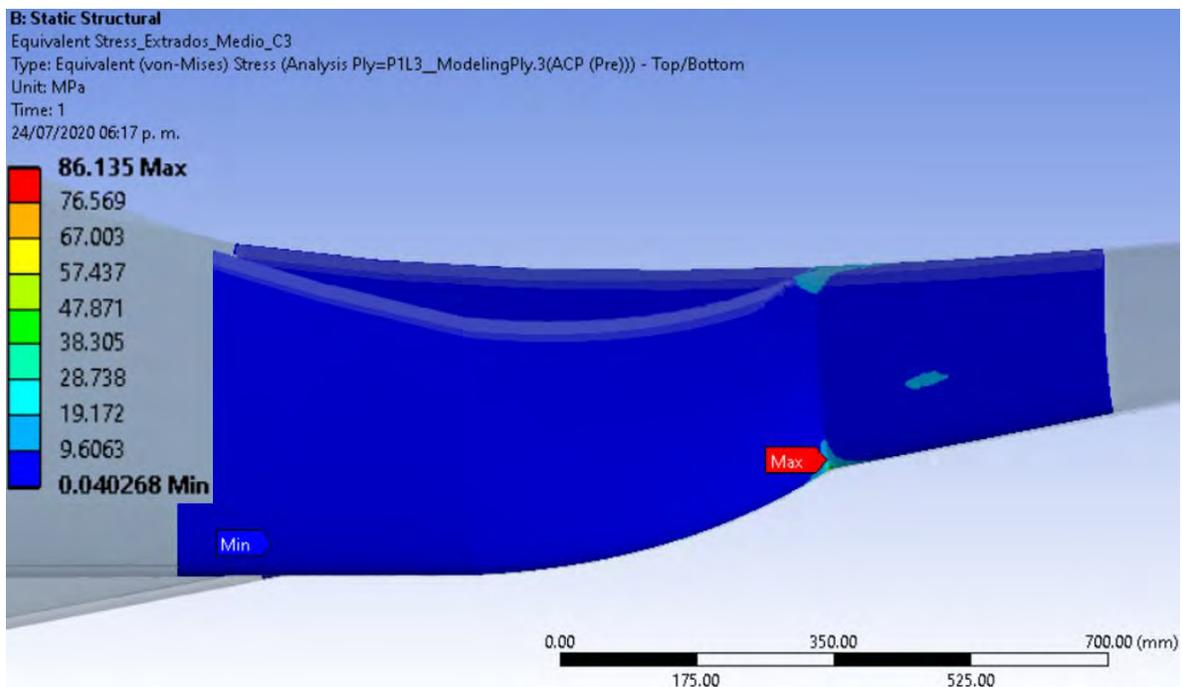


Imagen 41.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el intradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

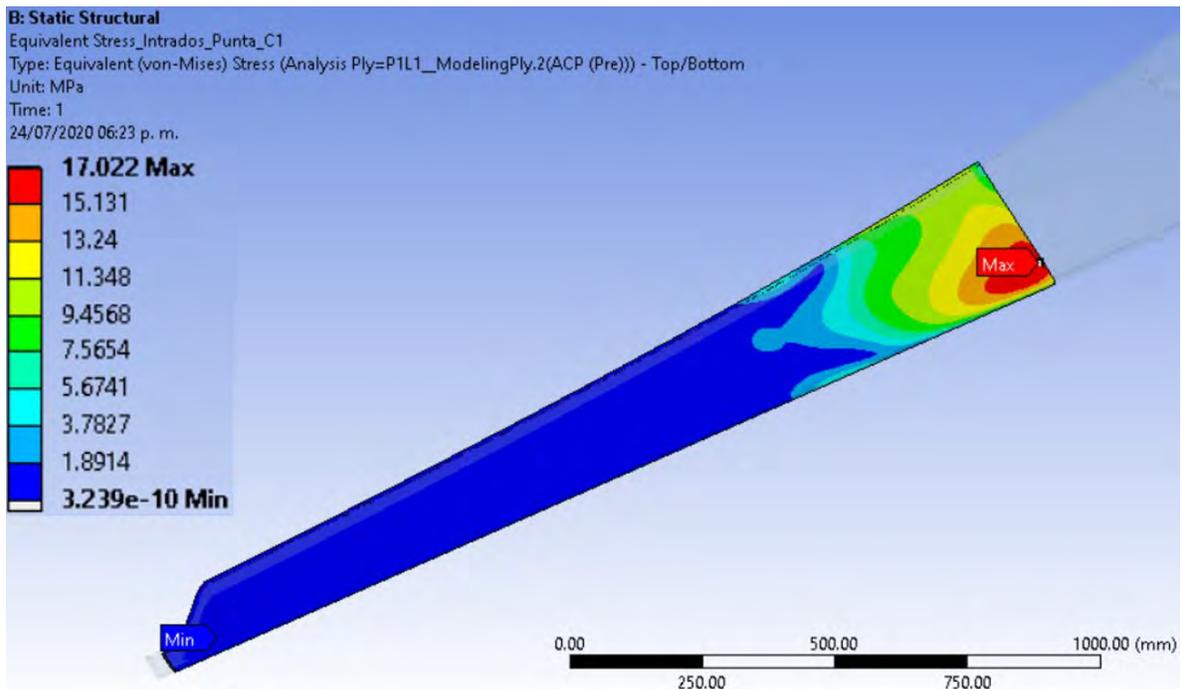


Imagen 42.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta.

El esfuerzo máximo en el extradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

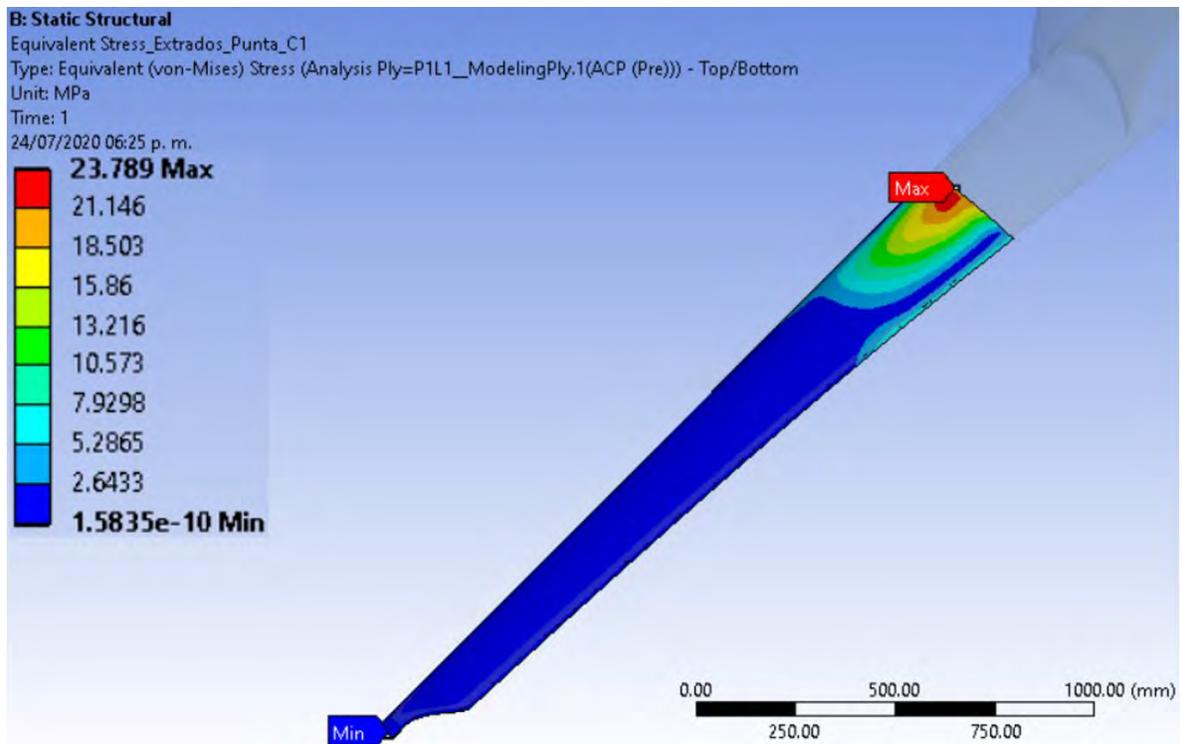


Imagen 43.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta.

Criterio de falla Tsai-Wu máximo: 0.4414 en la raíz.

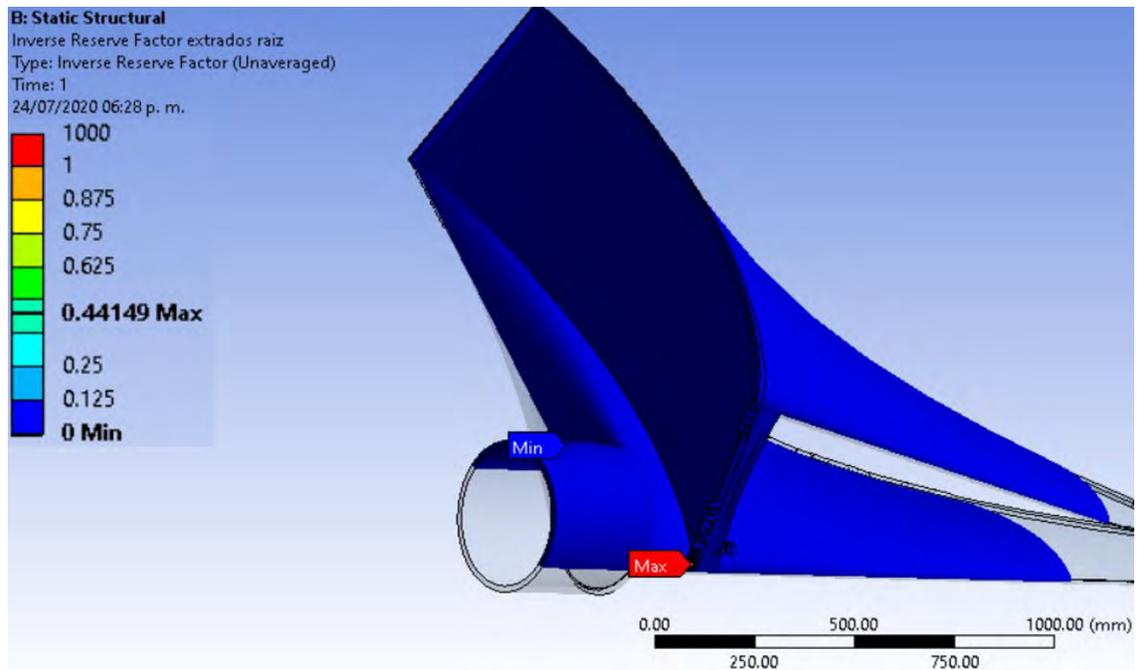


Imagen 44.- Tsai-Wu máximo en la raíz.

Resultados para el momento flector Edgewise (eje y).

Deformación total:

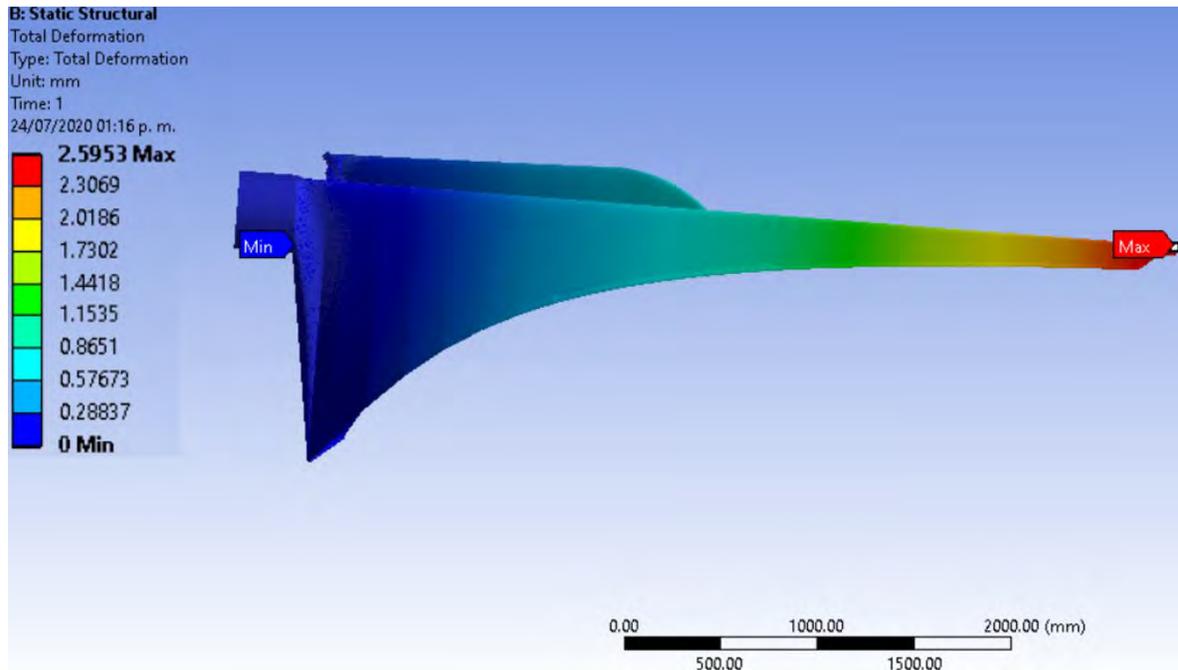


Imagen 45.- Deformación total.

El esfuerzo máximo en el intradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

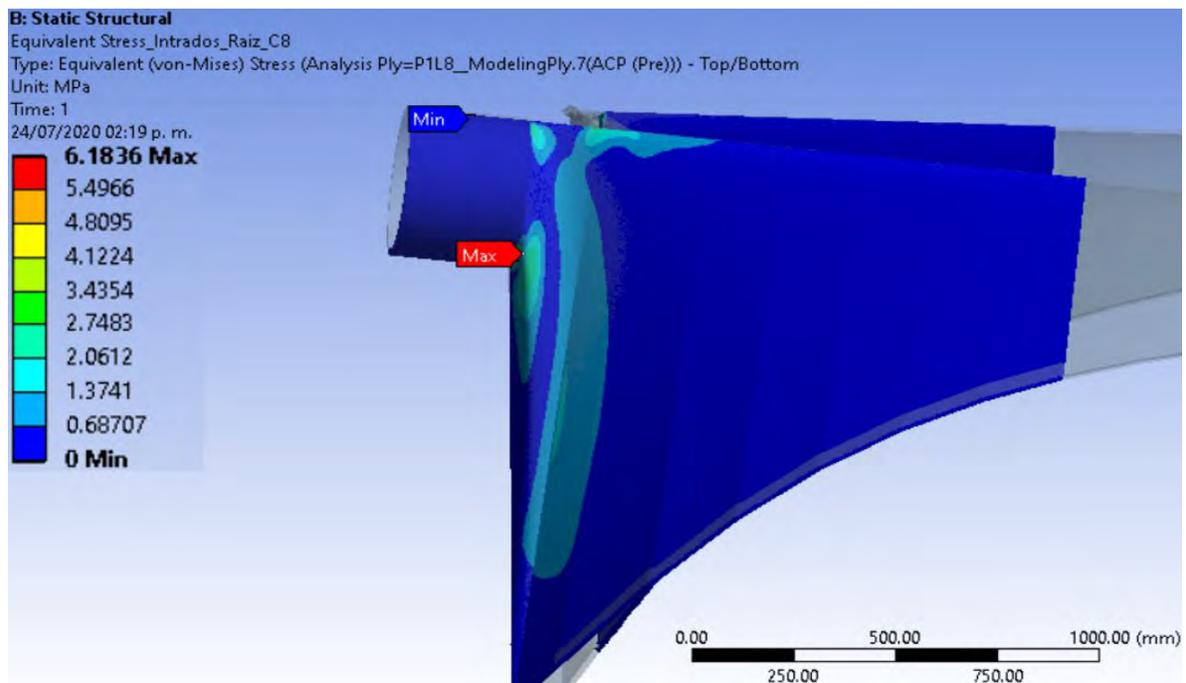


Imagen 46.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el extradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

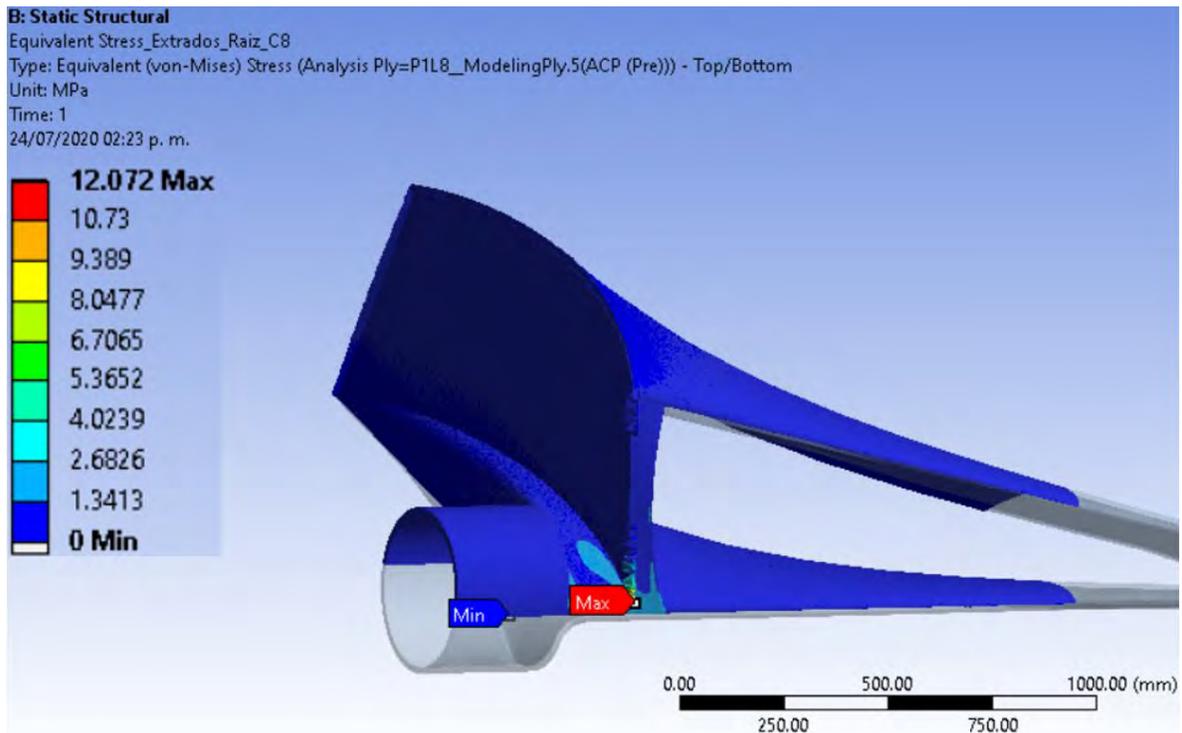


Imagen 47.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el intradós de la zona media, se presentó en la lámina 3, unidireccional a 90°:

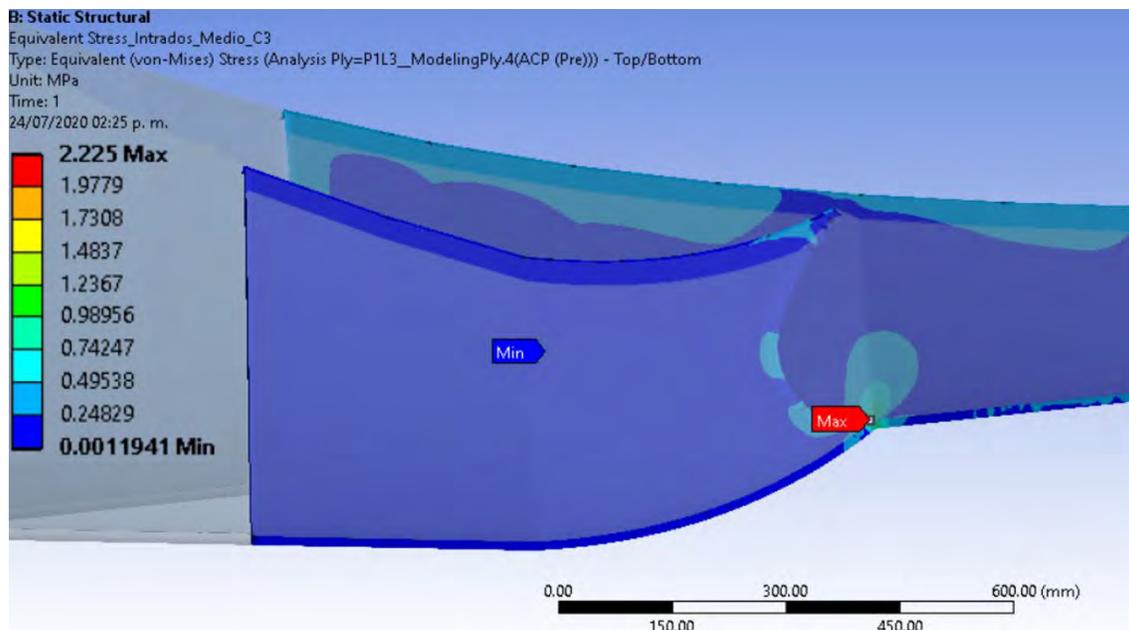


Imagen 48.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el extradós de la zona media, se presentó en la lámina 3, unidireccional a 90°:

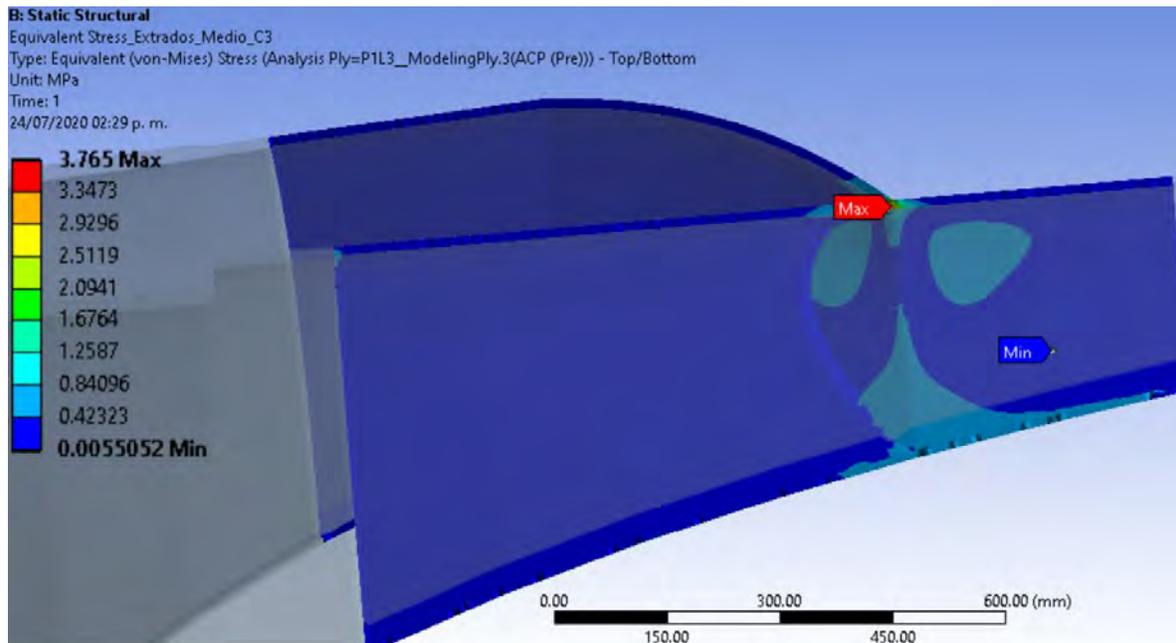


Imagen 49.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el intradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

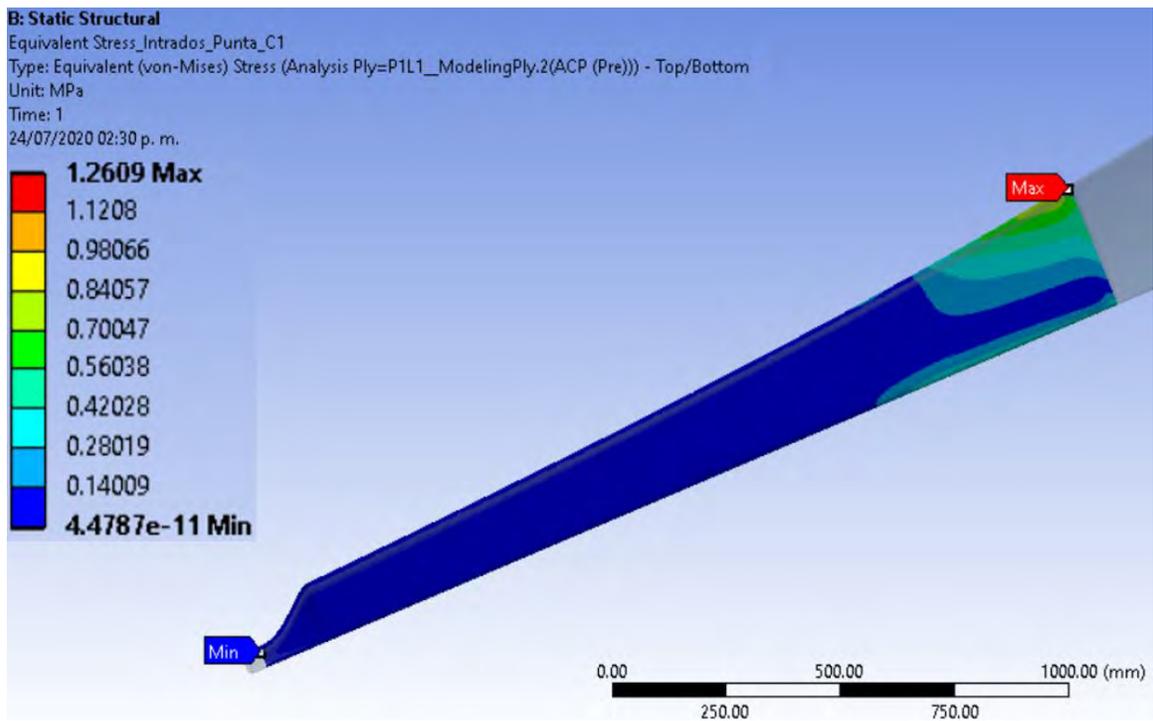


Imagen 50.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta.

El esfuerzo máximo en el extradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

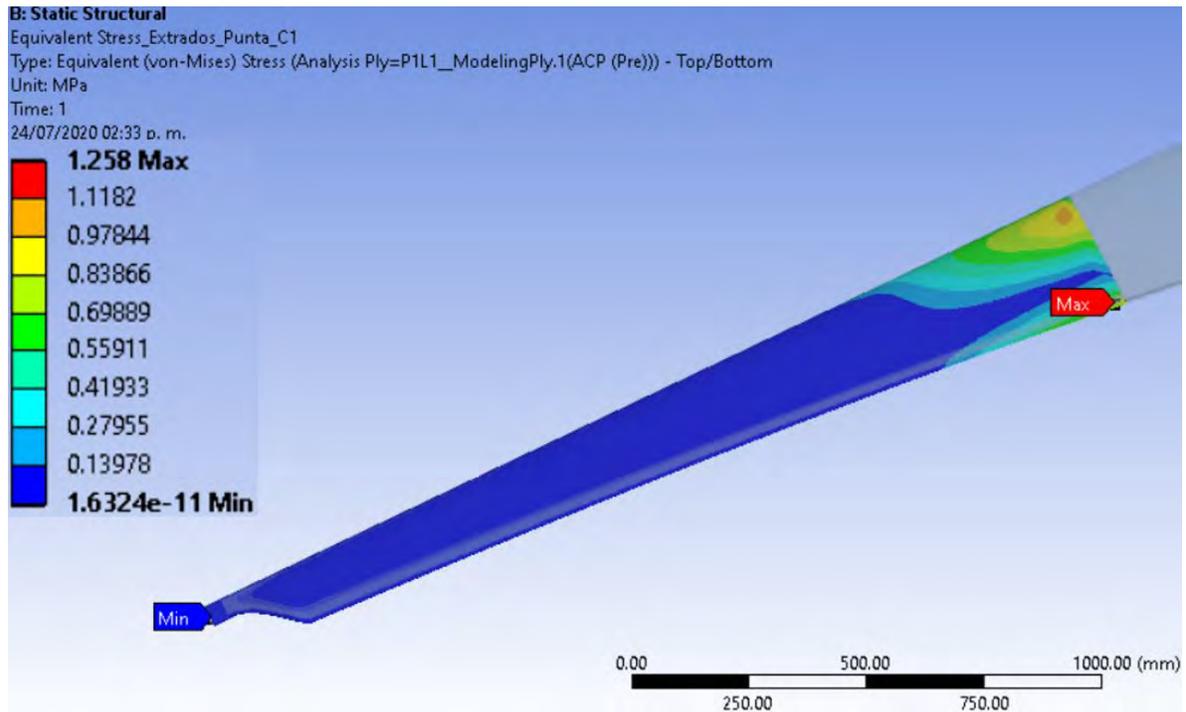


Imagen 51.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta.

Criterio de falla Tsai-Wu máximo: 0.0222, en la raíz.

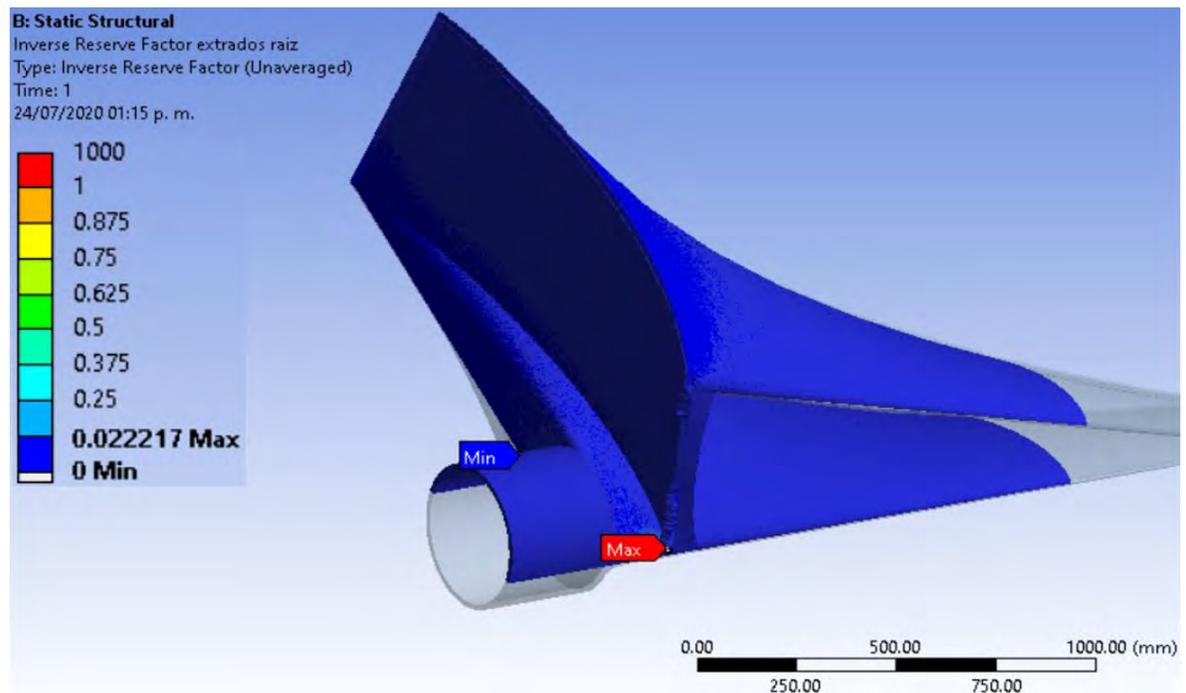


Imagen 52.- Tsai-Wu máximo en la raíz.

### 3.6.2 Hipótesis E: velocidad máxima del rotor

Deformación total:

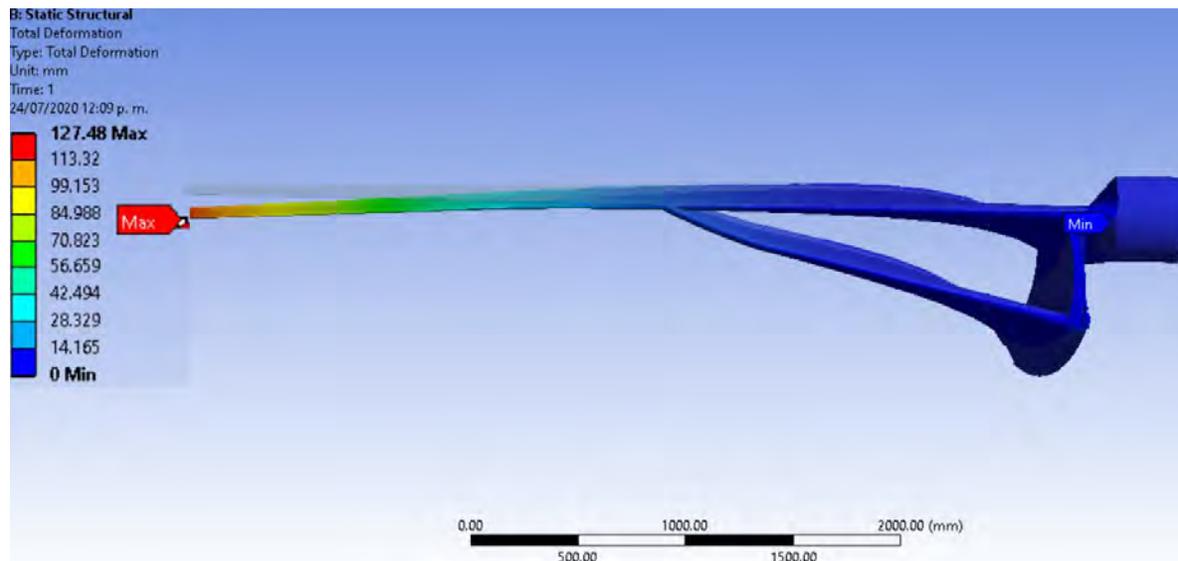


Imagen 53.- Deformación máxima.

El esfuerzo máximo en el intradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

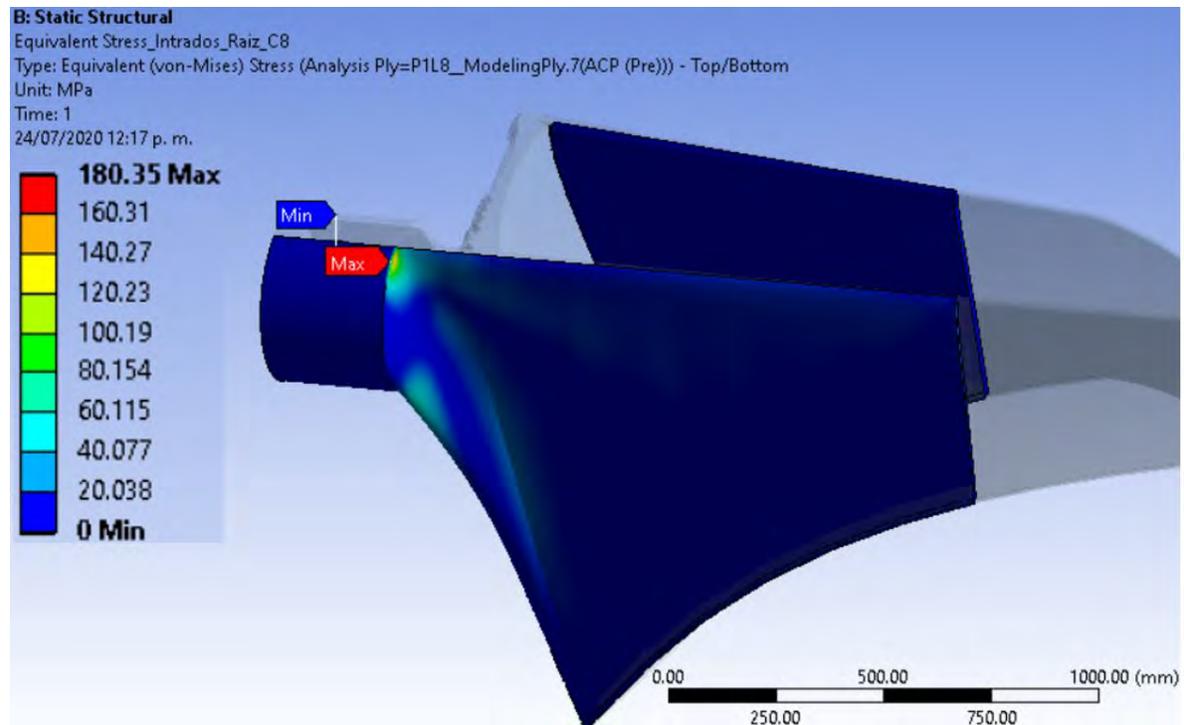


Imagen 54.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el extradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

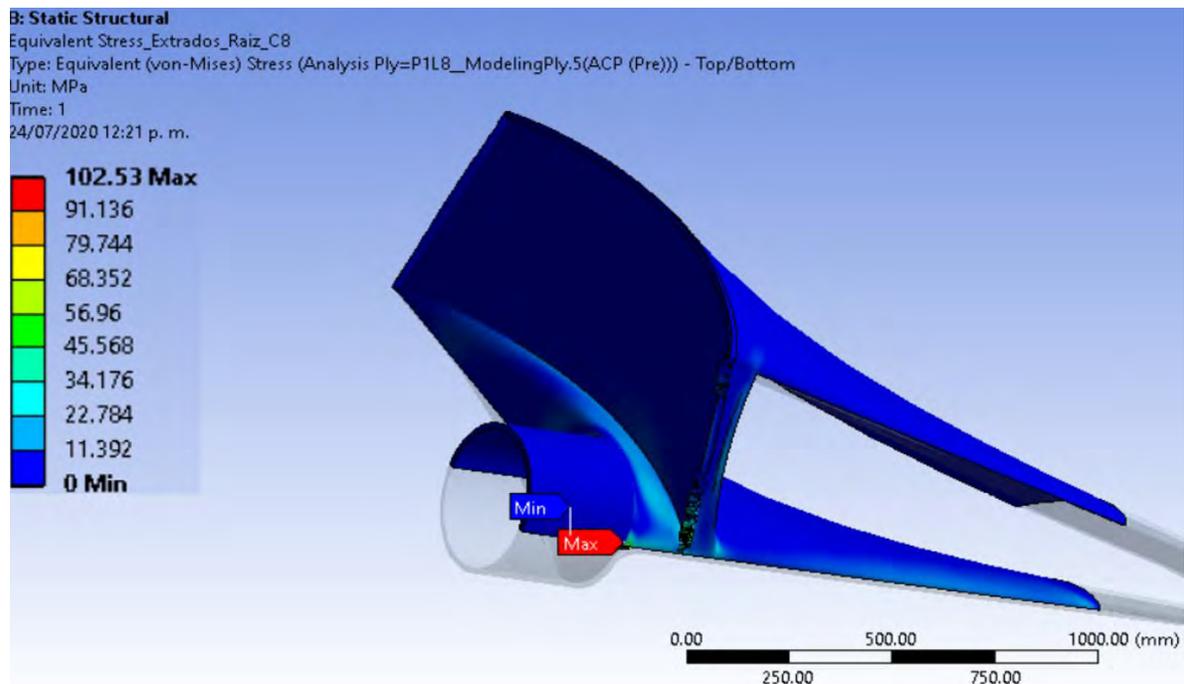


Imagen 55.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el intradós de la zona media, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

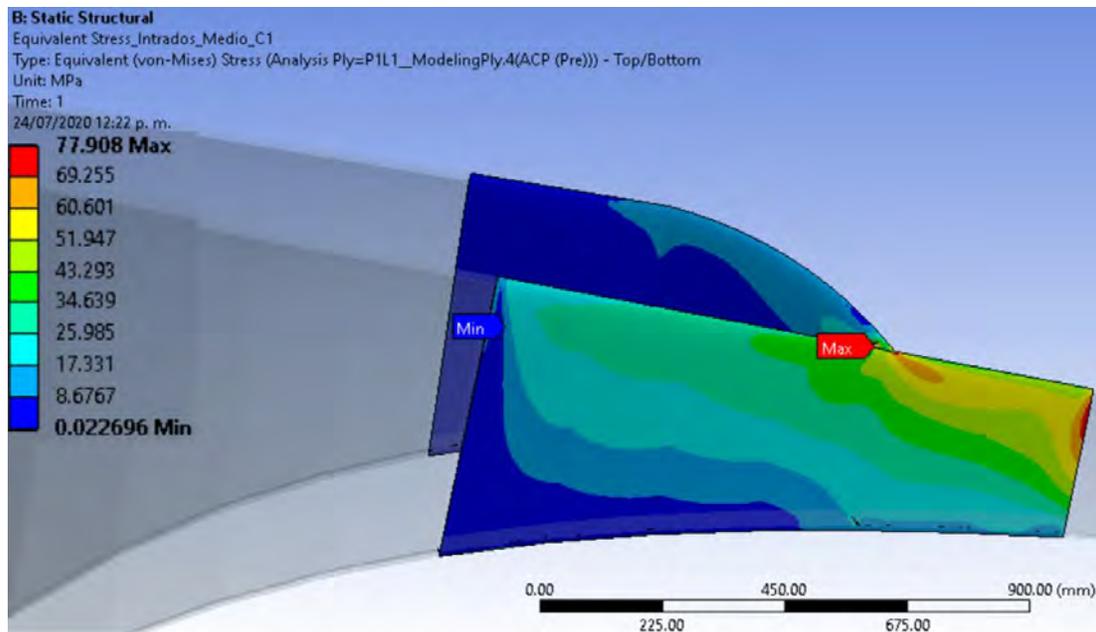


Imagen 56.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el extradós de la zona media, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

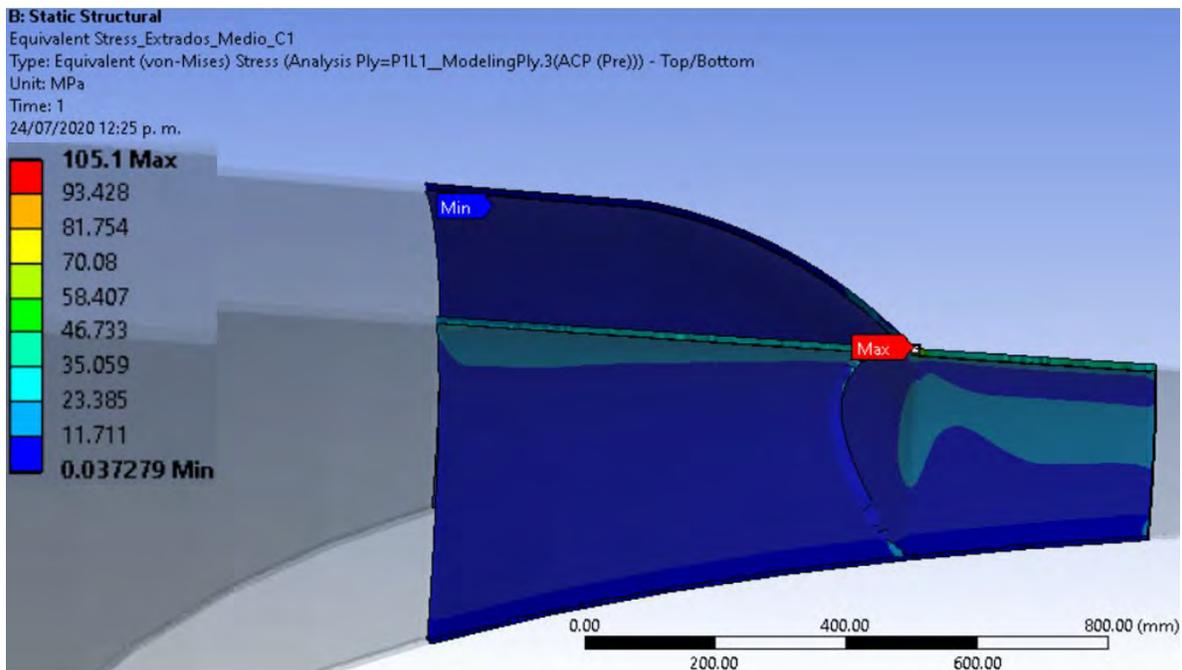


Imagen 57.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el intradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

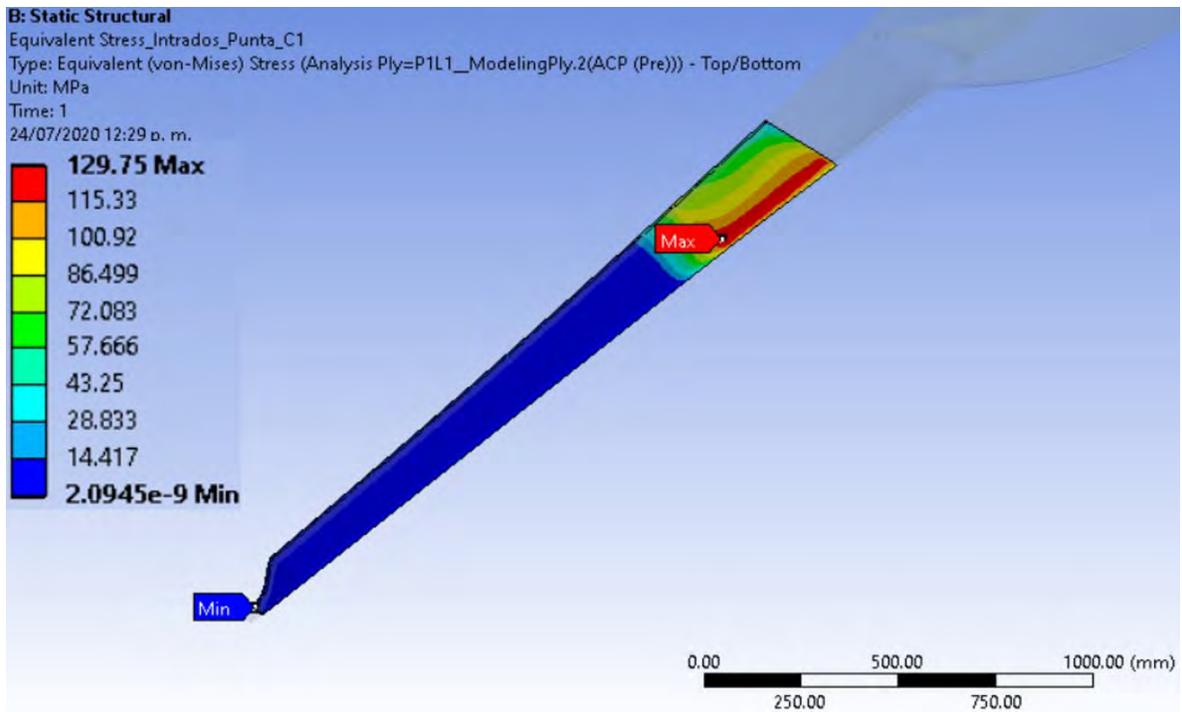


Imagen 58.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta.

El esfuerzo máximo en el extradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

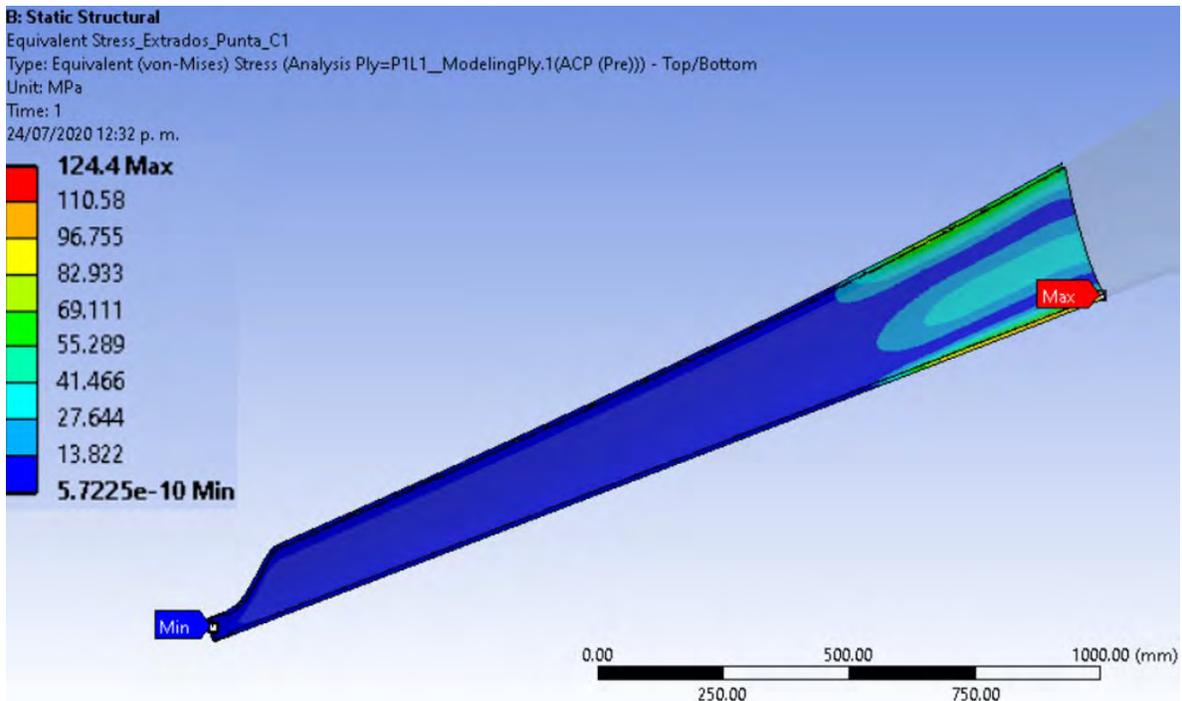


Imagen 59.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta.

Criterio de falla Tsai-Wu máximo: 0.3422, en la zona media.

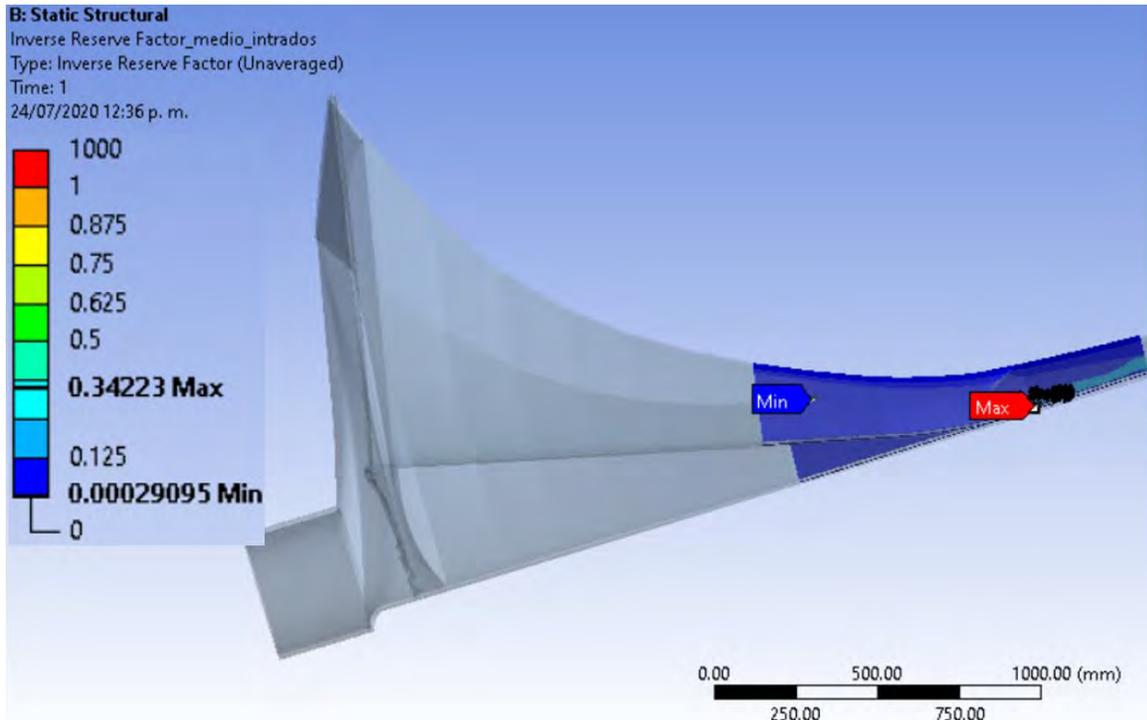


Imagen 60.- Tsai-Wu máximo en zona media.

### 3.6.3 Hipótesis H: carga extrema del viento

Deformación total:

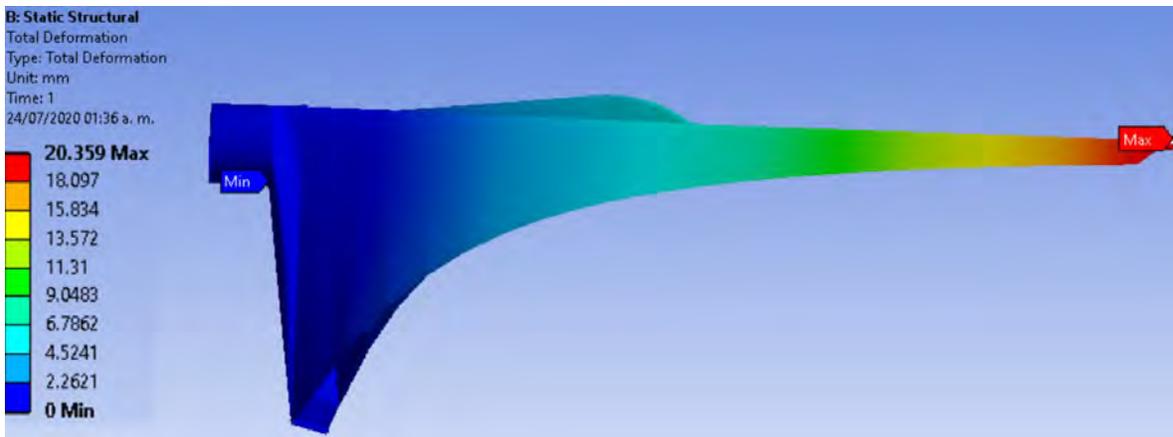


Imagen 61.- Deformación total.

El esfuerzo máximo en el intradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

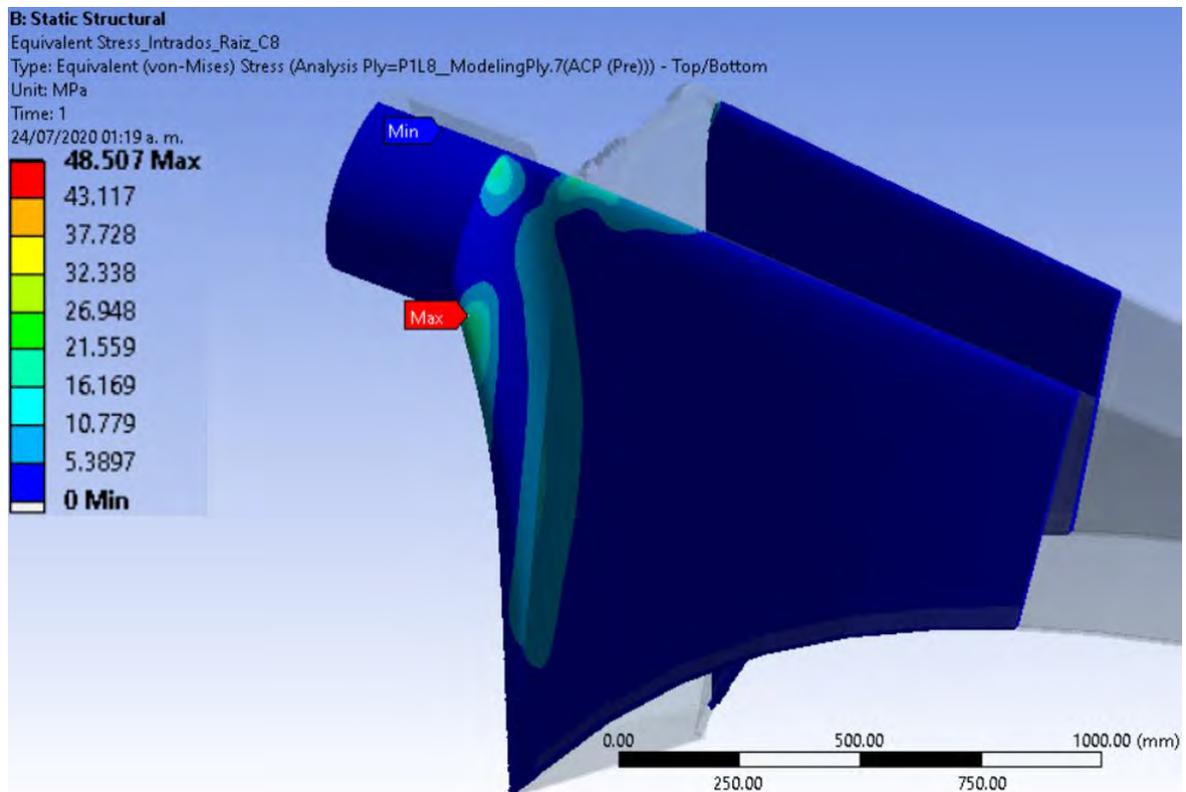


Imagen 62.- Esfuerzo máximo en intradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el extradós de la raíz, se presentó en la lámina 8, bidireccional a 45°:

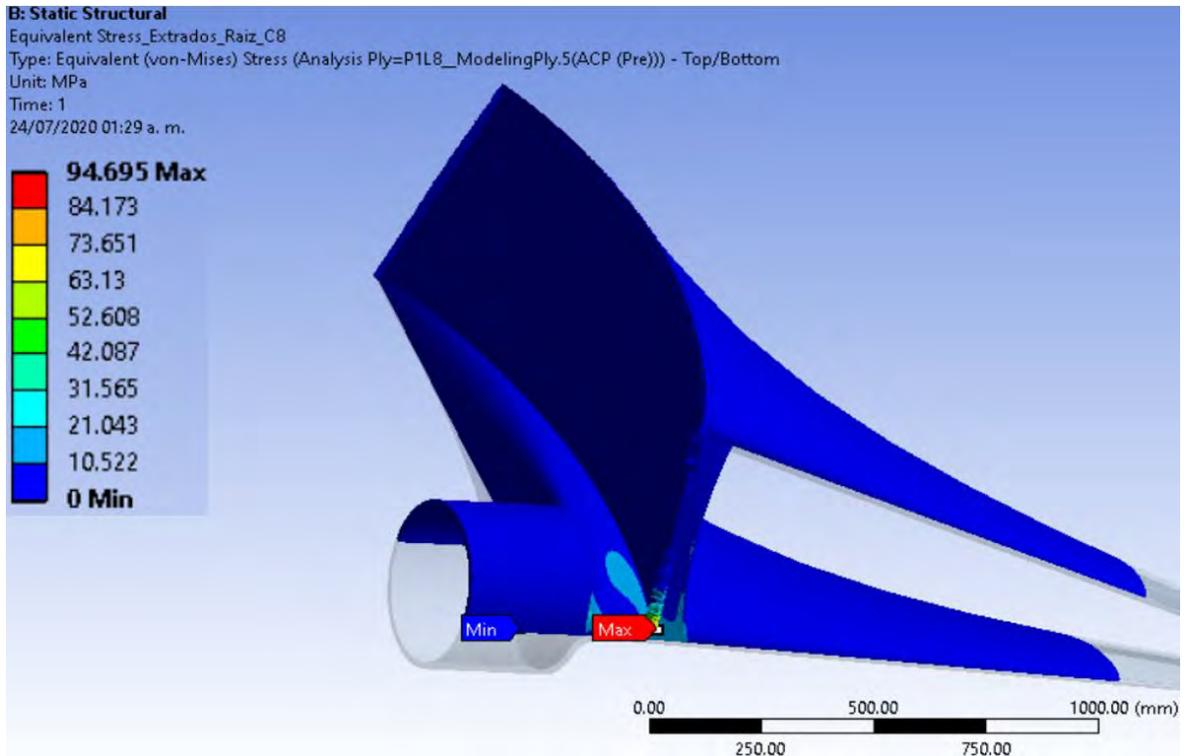


Imagen 63.- Esfuerzo máximo en extradós de la raíz.

El esfuerzo máximo en el intradós de la zona media, se presentó en la lámina 3, unidireccional a 90°:

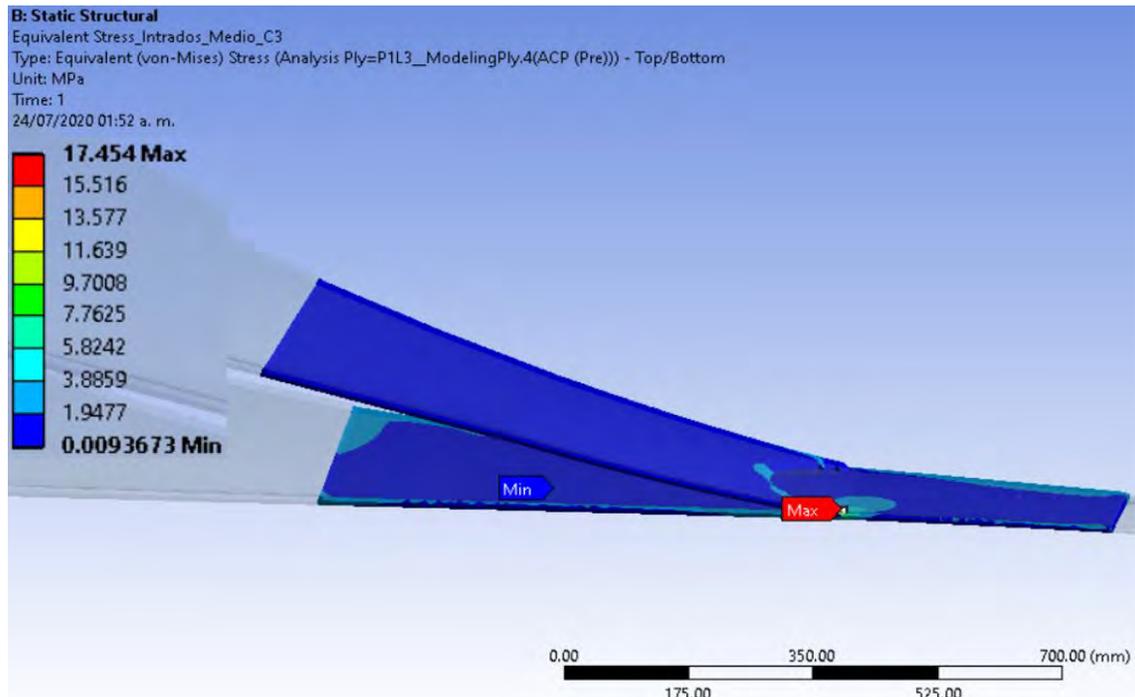


Imagen 64.- Esfuerzo máximo en intradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el extradós de la zona media, se presentó en la lámina 3, unidireccional a 90°:

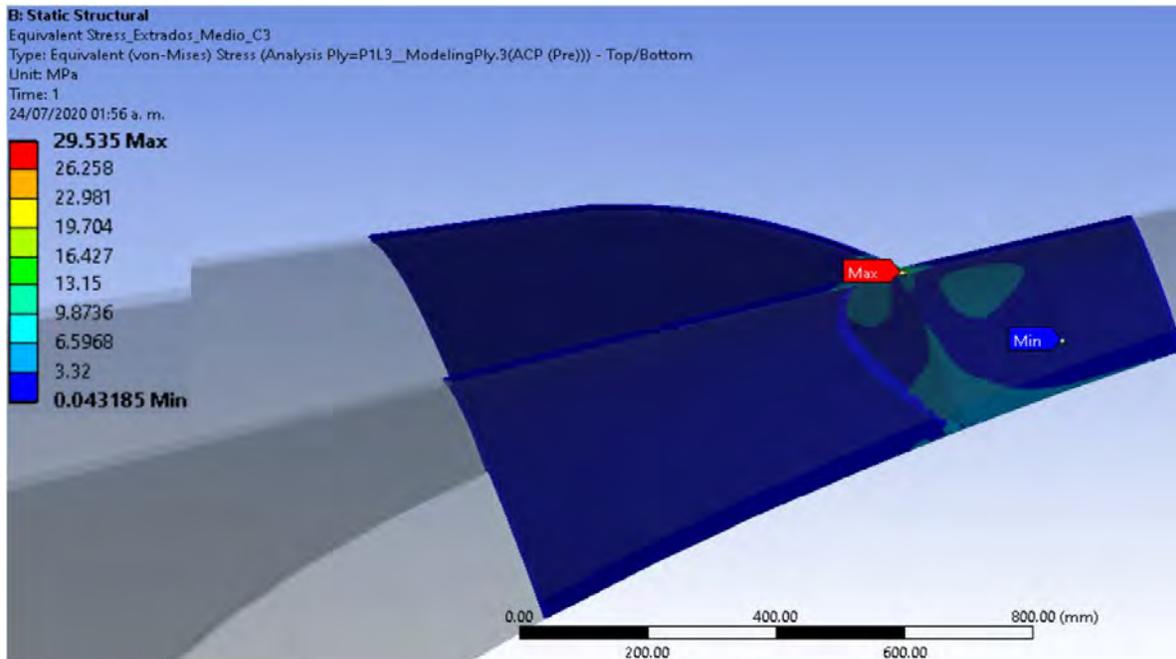


Imagen 65.- Esfuerzo máximo en extradós de la zona media.

El esfuerzo máximo en el intradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

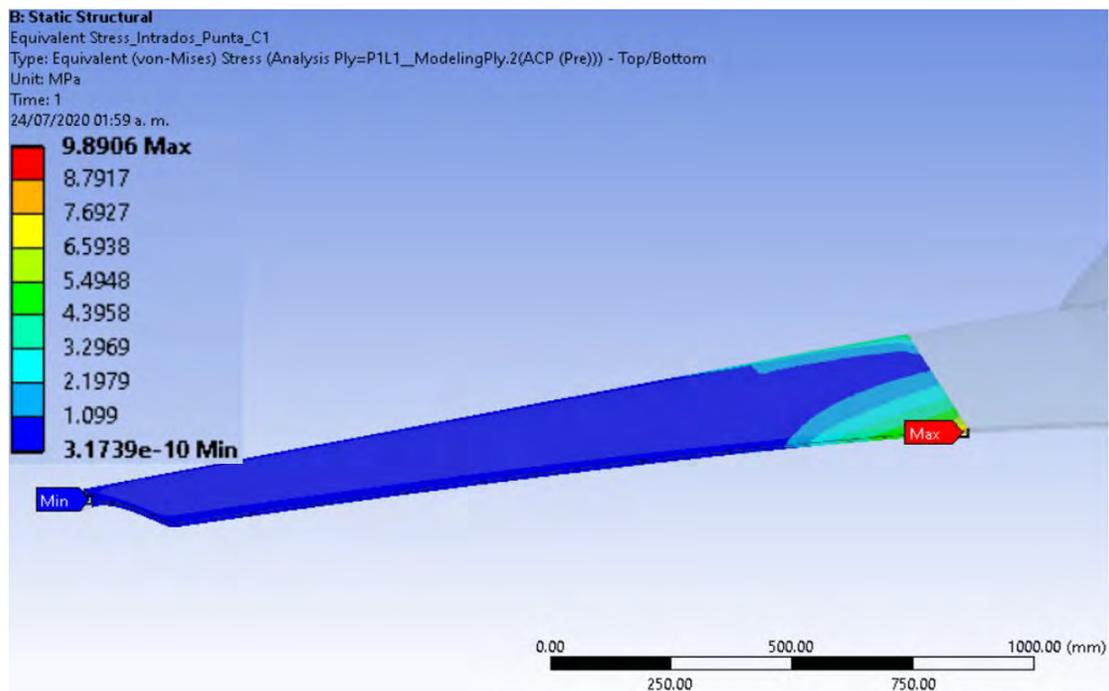


Imagen 66.- Esfuerzo máximo en intradós de la punta.

El esfuerzo máximo en el extradós de la punta, se presentó en la lámina 1, unidireccional a 90°:

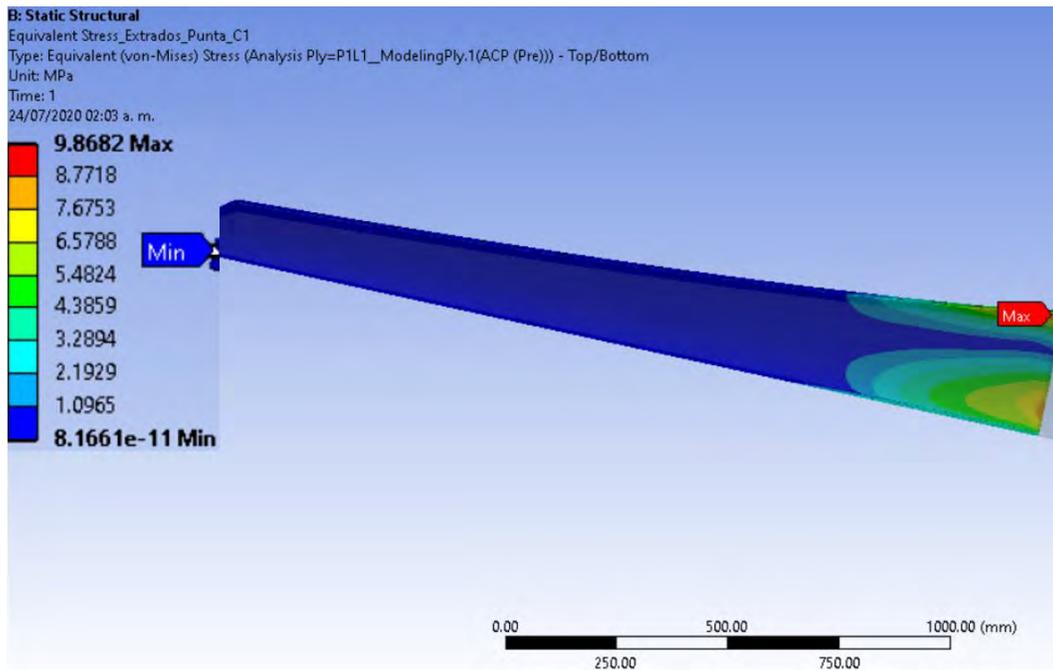


Imagen 67.- Esfuerzo máximo en extradós de la punta.

Criterio de falla Tsai-Wu máximo: 0.17428, en la raíz.

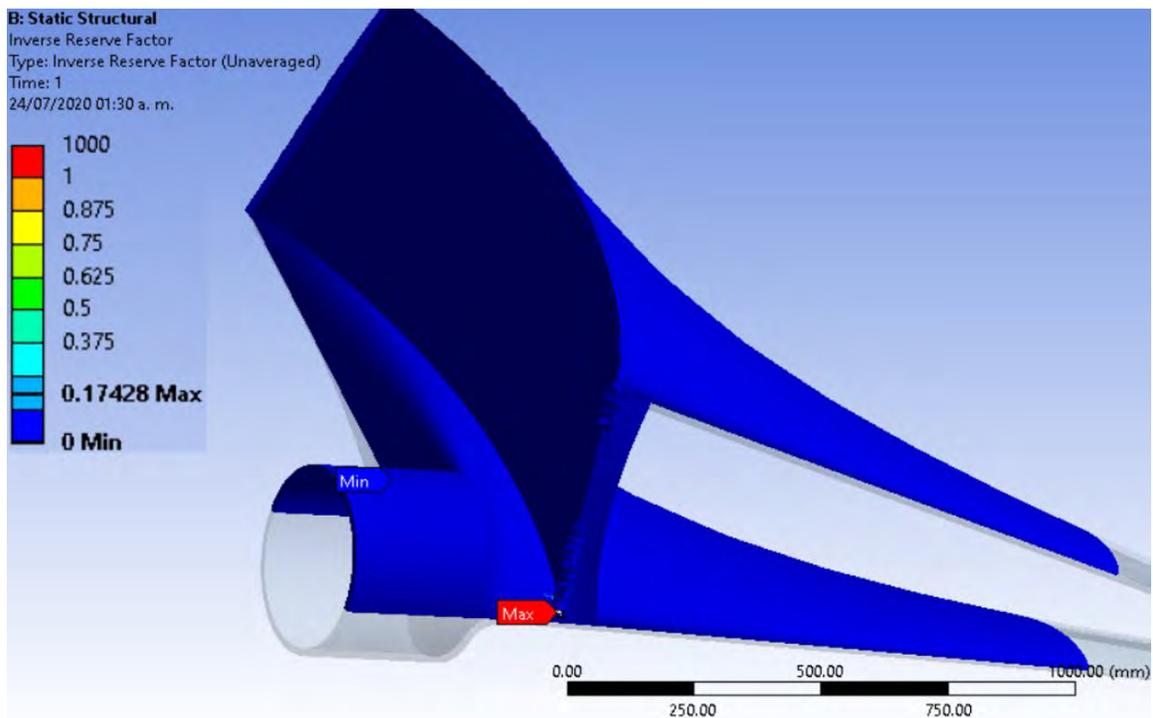


Imagen 68.- Tsai-Wu máximo en raíz.

Es importante resaltar que el módulo de Young empleado en ésta simulación difiere del módulo real del aspa a analizar en laboratorio. Se puede realizar la simulación con este módulo sin problemas ya que solo nos interesa conocer el comportamiento del aspa bajo las cargas y saber en qué puntos colocar las galgas extensométricas.

## CAPITULO IV. ENSAYOS ESTRUCTURALES EN ASPA DE DOBLE RAIZ

### 4.1 Extensometría

La extensometría es una técnica empleada para la medición de esfuerzos, torque, deformación, presión, etcétera, mediante la utilización de galgas extensométricas o “strain gages”. La galga más ampliamente utilizada es la confinada en papel metálico y consiste en un cable muy fino o papel aluminio dispuesto en forma de rejilla. Esta rejilla, maximiza la cantidad de metal sujeto a la deformación en la dirección paralela. La rejilla está pegada a un fino respaldo llamado portador, el cual está sujeto directamente a la pieza que se desea medir (imagen 69). Por lo tanto, la deformación experimentada por la pieza es transferida directamente a la galga, la cual responde con cambios lineales de resistencia eléctrica, por esto es de suma importancia que la galga sea apropiadamente montada sobre la pieza. La medida registrada por la galga puede ser positiva, lo cual nos indica un esfuerzo de tensión, o negativa siendo éste de compresión. [24]

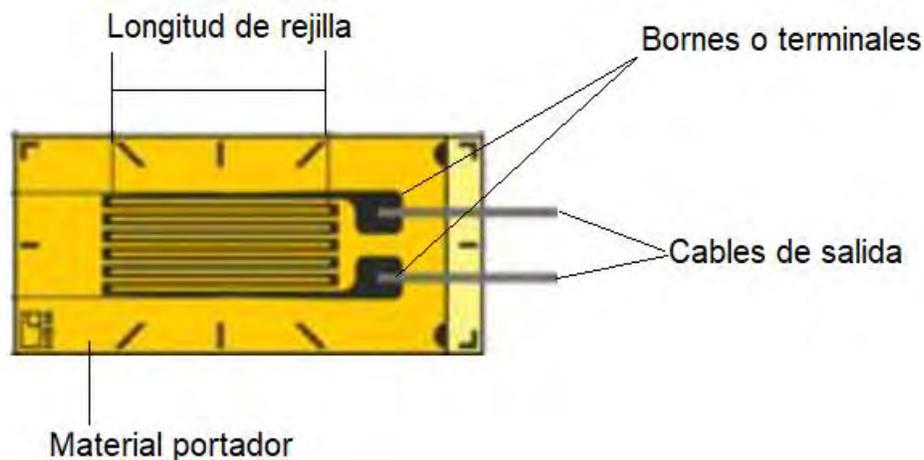


Imagen 69.- Galga extensométrica y sus partes principales.

Para medir con una galga extensométrica se debe cumplir lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{R}{\Delta R} \times GF \quad (54)$$

donde

$\varepsilon$ = deformación

GF= factor de galga

R= resistencia de la galga

$\Delta R$ = variación de la resistencia [24]

Las galgas se encuentran en el mercado con valores nominales de resistencia de 30 a 3000  $\Omega$ , siendo los de 120, 350 y 1000  $\Omega$ , los valores más comunes.

Un parámetro fundamental de las galgas es la sensibilidad a la deformación, expresado cuantitativamente como el factor de galga (GF). El factor de galga es definido como la relación de variación fraccional de resistencia eléctrica y la variación fraccional de longitud. [24]

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (55)$$

#### 4.1.1 Selección de una galga extensométrica

Básicamente, para seleccionar una galga adecuadamente, debemos determinar una combinación particular de parámetros que sea lo más compatible con las condiciones ambientales y de operación, y al mismo tiempo, que mejor satisfaga la instalación y requerimientos. Estos requerimientos pueden ser:

- Durabilidad
- Estabilidad
- Elongación
- Facilidad de instalación
- Precisión
- Resistencia cíclica
- Resistencia ambiental [24]

#### 4.1.2 Parámetros de una galga

La instalación y las características de operación de una galga están afectadas por los siguientes parámetros que pueden ser seleccionados en diferentes grados:

- Sensibilidad a la deformación de la aleación
- Autocompensación de la temperatura
- Material de soporte
- Resistencia de la rejilla
- Longitud de la galga
- Patrón de galga [24]

#### 4.1.3 Tipos de aleaciones para galgas

El componente principal que determina las características de operación de una galga es la aleación sensible a la deformación que compone la rejilla de papel metálico. Sin embargo, la aleación no es en todos los casos un parámetro de selección independiente. Esto es porque cada galga se diseña como un sistema completo, compuesto por la combinación de un soporte y un papel metalizado particular.

- Aleación A: Constantan, una aleación de cobre y nickel, autocompensado por temperatura.

- Aleación P: Constantan templado.
- Aleación D: Aleación isoelástica de cromo y nickel.
- Aleación K: Aleación de cromo y nickel, Karma autocompensado por temperatura. [24]

#### **4.1.4 Materiales de soporte**

La confección de una galga se realiza mediante un grabado del papel metálico sobre un material de soporte que cumpla con las siguientes funciones:

- Proveer el medio de sustento a la rejilla metálica durante la instalación.
- Presentar una superficie para confinar y pegar la galga al material de prueba.
- Proveer un aislamiento eléctrico entre la rejilla y el material de prueba.

Los materiales de respaldo para galgas son básicamente de dos tipos: poliamida y fibra de vidrio reforzada con epoxi-fenólico. [24]

#### **4.2 Propuesta de instalación de galgas extensométricas**

El lugar donde se colocarán las galgas se eligió en base a los resultados obtenidos en la simulación numérica. Cabe destacar que 2 de los 5 modos de carga no se pueden reproducir en laboratorio debido a la complejidad de las mismas, por lo tanto, se limita a 3 modos de carga.

Para colocar las galgas primero debemos ver que la deformación axial del aspa no supere el límite de deformación de la propia galga. Para el análisis utilizaremos galgas de Vishay Micro-Measurements CEA-06-240UZ-120. Esas galgas tienen una longitud de 12 mm y una longitud de rejilla de 7 mm. Los datos técnicos nos dicen que la máxima deformación que soporta la galga, es el  $\pm 5\%$  de la longitud de rejilla, 7.35 mm a tensión, lo que equivale a 7350 micras o microdeformaciones y 6.65 mm o 6650 micras o microdeformaciones a compresión [25].

Bajo esos límites plantearé la ubicación de las galgas para asegurar su correcto funcionamiento.

Otra consideración es el equipo a utilizar para medir las microdeformaciones, el cual será un Indicador de tensión y registrador modelo P3 (imagen 69), el cual cuenta con las siguientes características:

Cuatro canales de entrada

Pantalla LCD de lectura directa

Almacenamiento de datos a bordo

Salida analógica de 0 a 2.5 VDC.

Circuitos de un cuarto, medio y puente completo

Finalización de puente incorporado

Medidores simulados de 120, 350 y 1000 ohmios.

Calibración cero automática y calibración.

Operaciones intuitivas, impulsadas por menús.

Enlace de datos USB

Operación desde teclado o PC

Portátil, ligero y robusto

Batería, USB, o alimentación de voltaje de línea.

Conectores de transductor opcionales de 10 pines.



Imagen 70.- Indicador de tensión y registrador.

La forma en que se mide la microdeformación es mediante un puente de Wheatstone, el cual puede ser un cuarto de puente, medio puente o el puente completo como se muestra en la siguiente imagen:

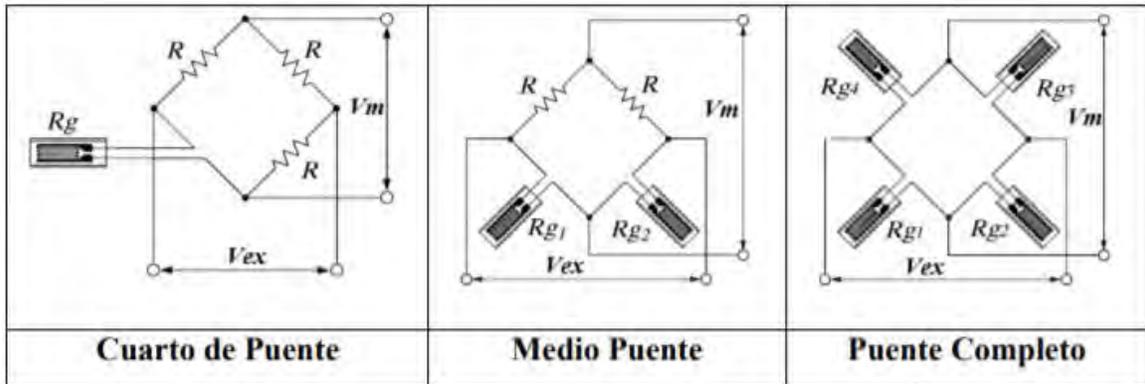


Imagen 71.- Tipos de configuración del puente de Wheatstone. [26]

Para llevar a cabo las mediciones de este proyecto, todas las galgas se conectaron en un cuarto de puente.

#### 4.2.1 Propuesta para hipótesis A

En la hipótesis de carga A, serán dos modos de carga, Edgewise y Flapwise.

##### 4.2.1.1 Edgewise

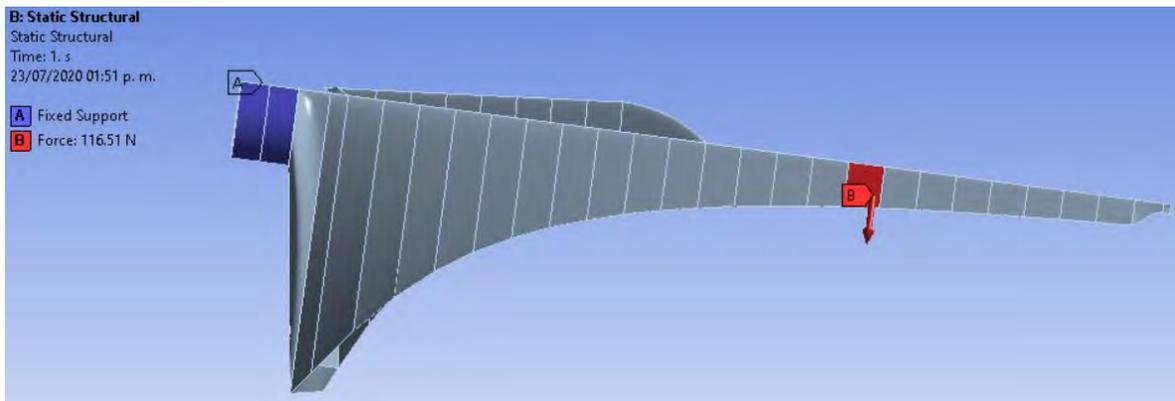


Imagen 72.- Hipótesis de carga A: Edgewise

Las deformaciones axiales para este modo de carga se aprecian en la siguiente imagen:

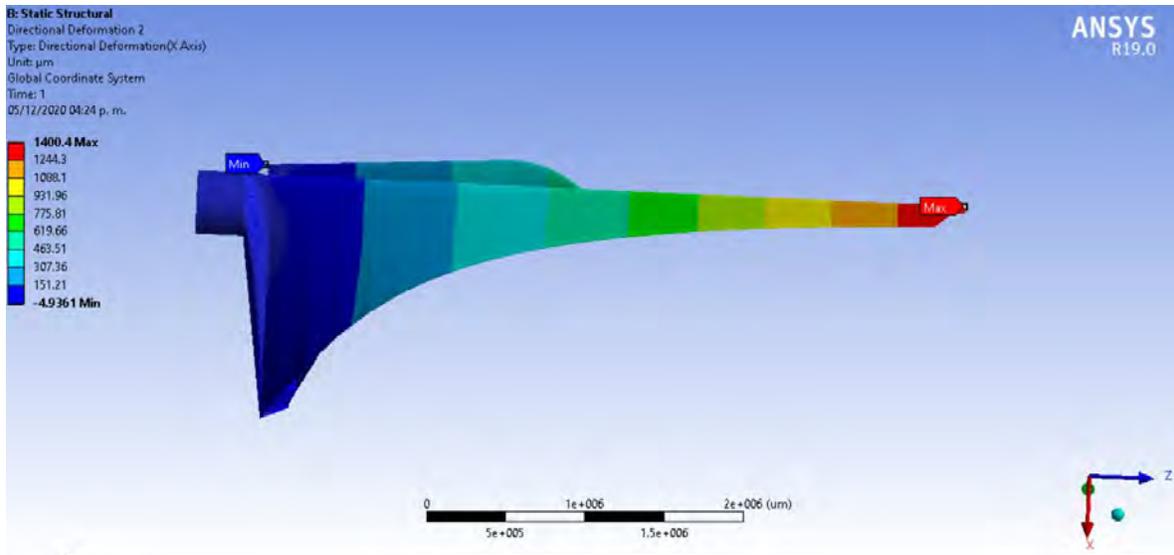


Imagen 73.- Microdeformaciones para hipótesis de carga A: Edgewise.

Se observa que la máxima deformación a tensión es de 1400 micras y a compresión de 4.9361 micras, por lo tanto, la galga trabajará de forma segura en este modo de carga.

Utilizaré las galgas en la misma posición que en la hipótesis H (ver hipótesis H), ya que los resultados de la simulación son similares, solo cambiando la magnitud.

#### 4.2.1.2 Flapwise

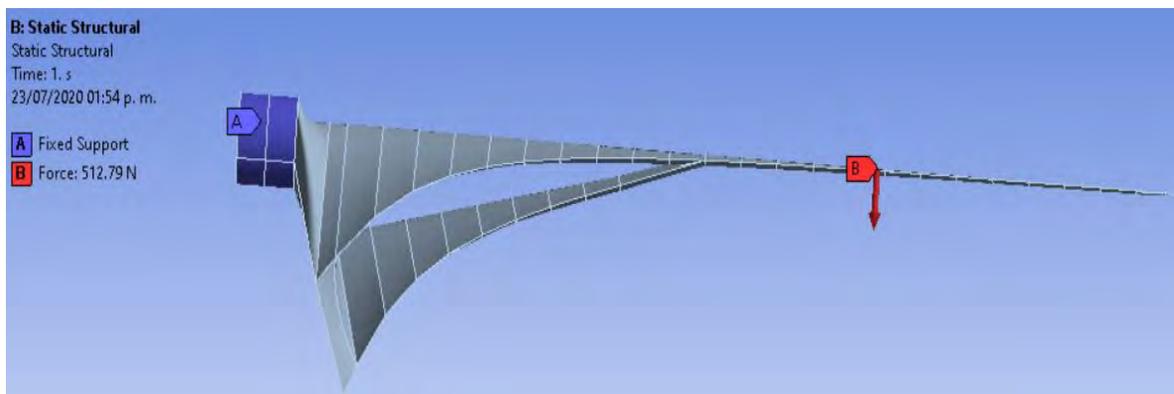


Imagen 74.- Hipótesis de carga A: Flapwise.

Las microdeformaciones axiales arrojadas por el software de elemento finito se aprecian en la siguiente imagen:

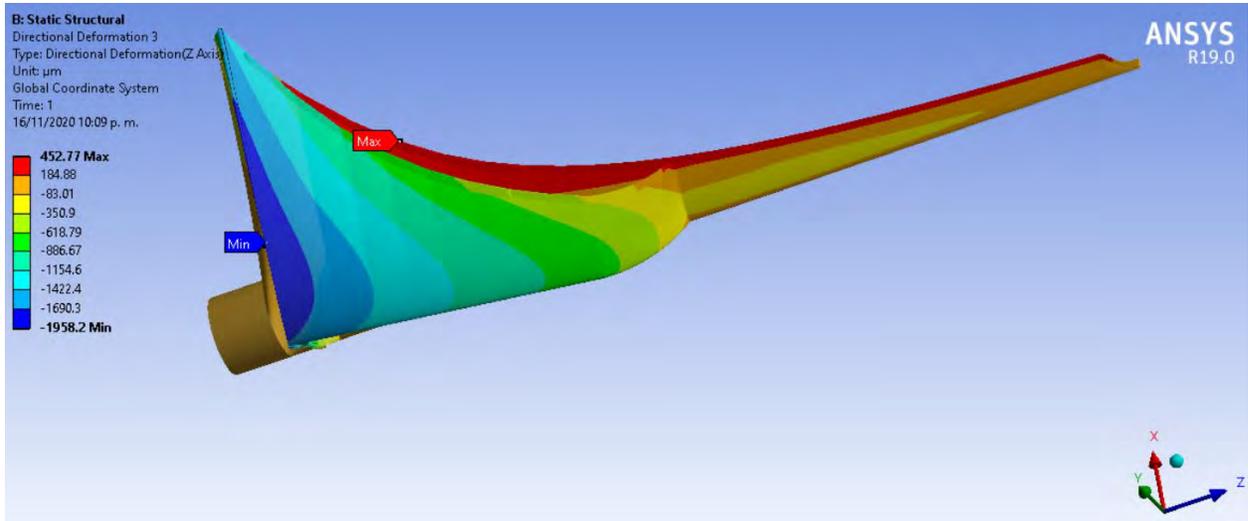


Imagen 75.- Microdeformaciones para hipótesis de carga A: Flapwise.

Podemos observar que la deformación máxima a tensión es de 452.77 micras, mientras que a compresión es de 1958.2 micras, por lo tanto, podemos concluir que las galgas trabajarán muy seguras ya que los valores están lejos de los límites.

En el extradós de la raíz:

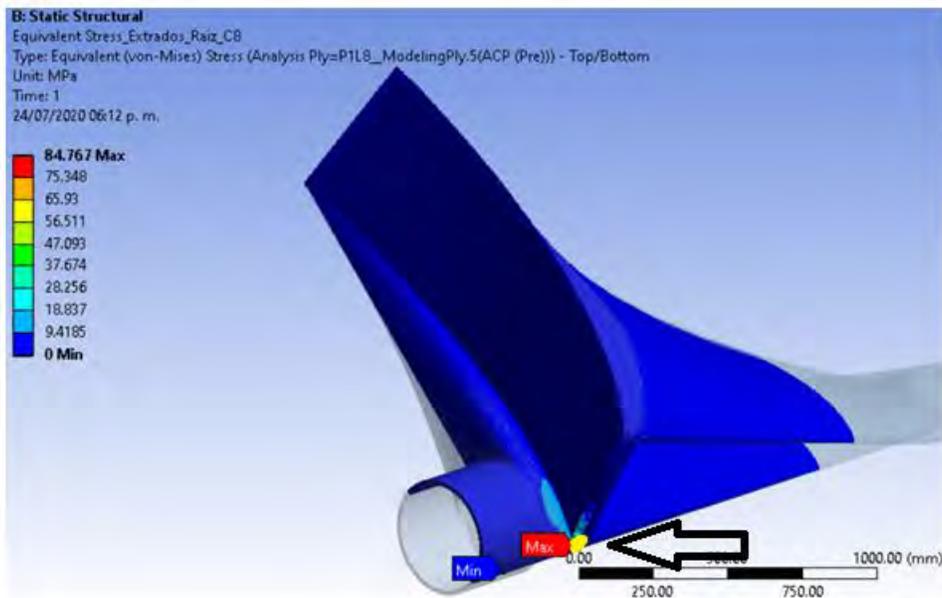


Imagen 76.- Ubicación de galga cerca de raíz.

En el extradós de la segunda raíz y otra en el intradós de la misma en la misma posición, pero por abajo:

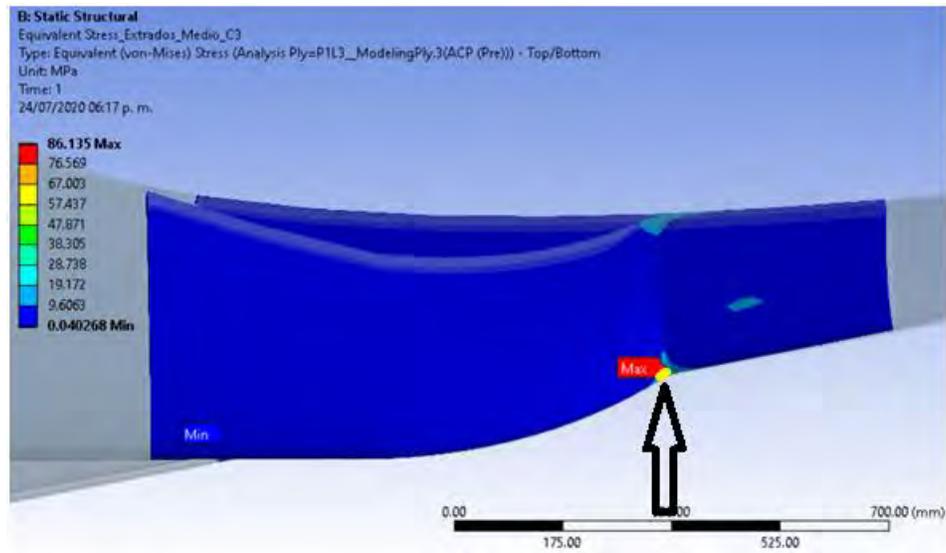


Imagen 77.- Ubicación de las galgas en la segunda raíz, intradós y extradós.

En el intradós de la raíz principal:

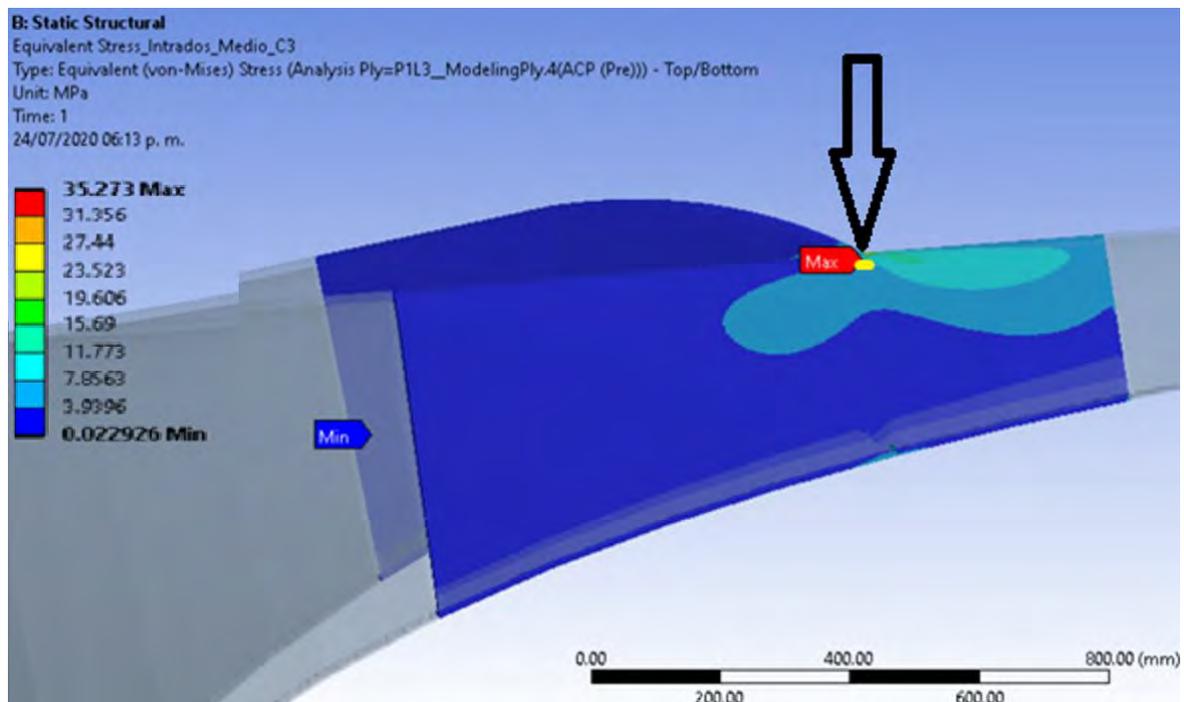


Imagen 78.- Galga en el intradós de la raíz principal.

#### 4.2.2 Propuesta para la hipótesis de carga H

La hipótesis H solo será probada a Edgewise (imagen 79), cabe destacar que esta es la carga crítica, ya que es la más grande en cuanto a magnitud se refiere.

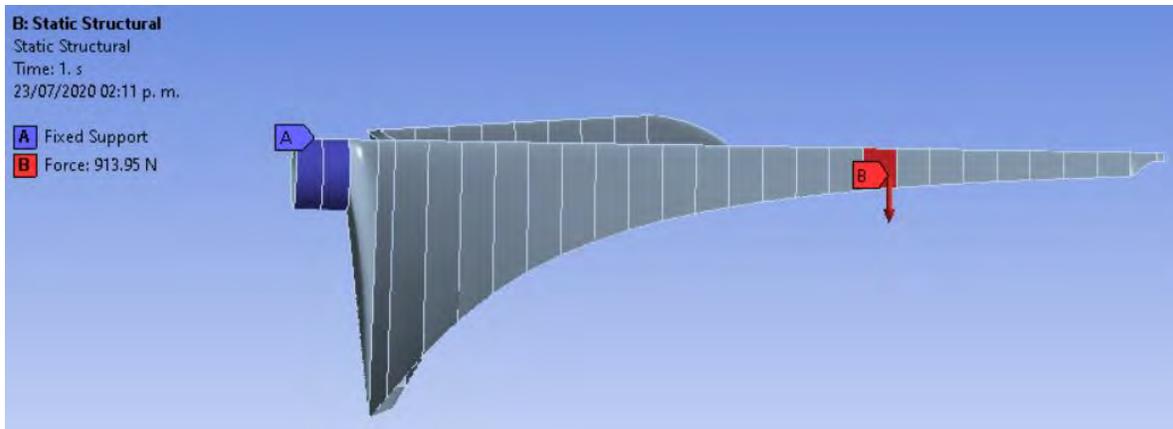


Imagen 79.- Hipótesis de carga H.

A continuación se muestran las microdeformaciones para este modo de carga:

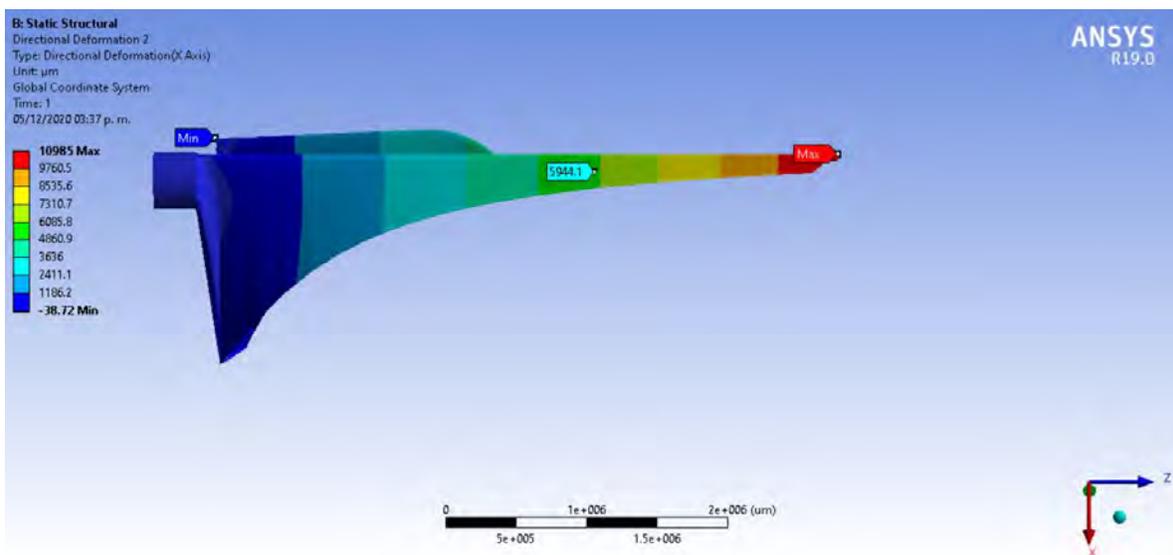


Imagen 80.- Microdeformaciones para hipótesis de carga H.

He colocado un probador como seguridad para ver hasta qué punto puedo colocar las galgas, es un 10% por debajo de lo que la galga admite para estar seguro. Ese punto coincide con la fuerza, por lo que las galgas estarán de ese punto hacia atrás. Colocaré una galga en la unión de las raíces por el lado de abajo y otra en la unión, pero por el lado de arriba como se muestra a continuación:

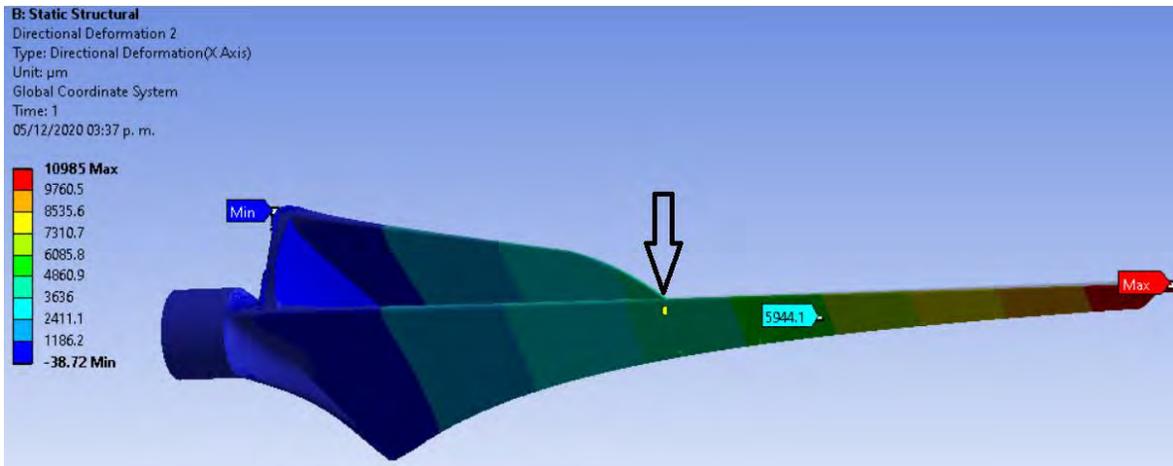


Imagen 81.- Galga en el intradós de la raíz principal.

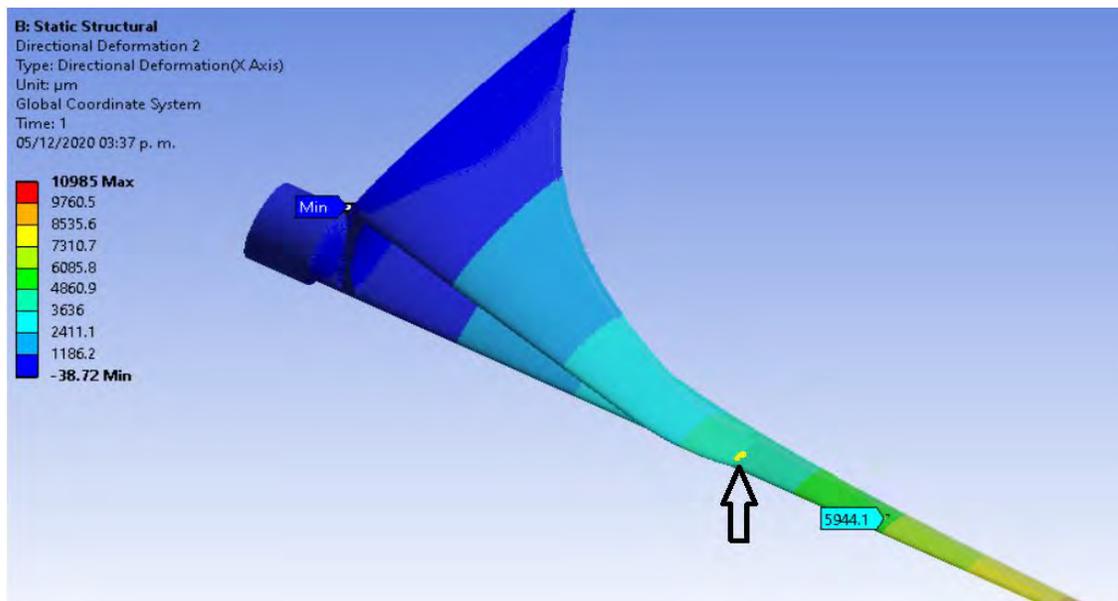


Imagen 82.- Galga en el extradós de la segunda raíz.

Las otras galgas serán colocadas en la misma dirección, pero una en la parte superior y otra en la inferior para ver el comportamiento:

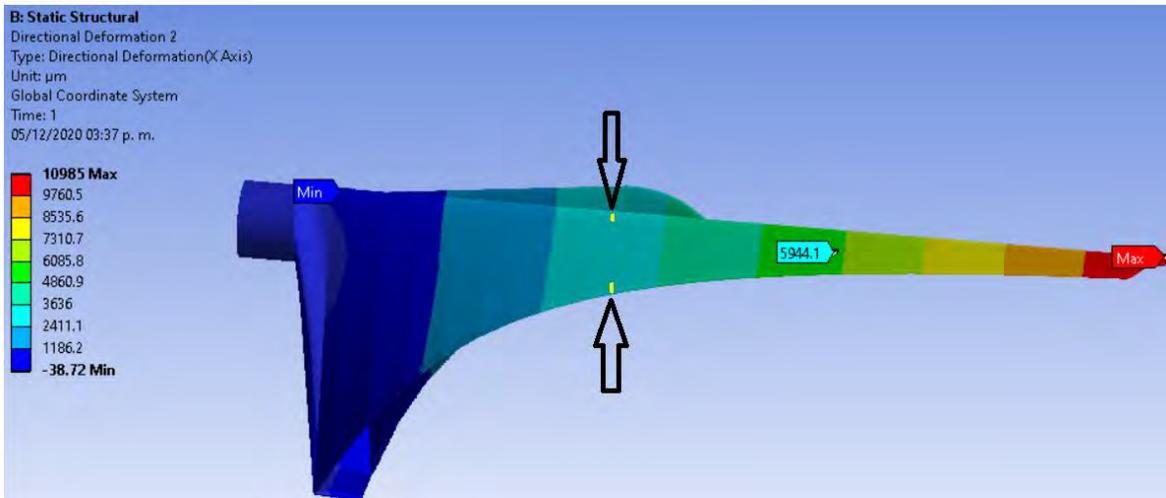


Imagen 83.- Galgas en el intradós de la raíz principal.

También se colocarán dos galgas adicionales para obtener una pendiente con los resultados y poder comparar los resultados obtenidos:

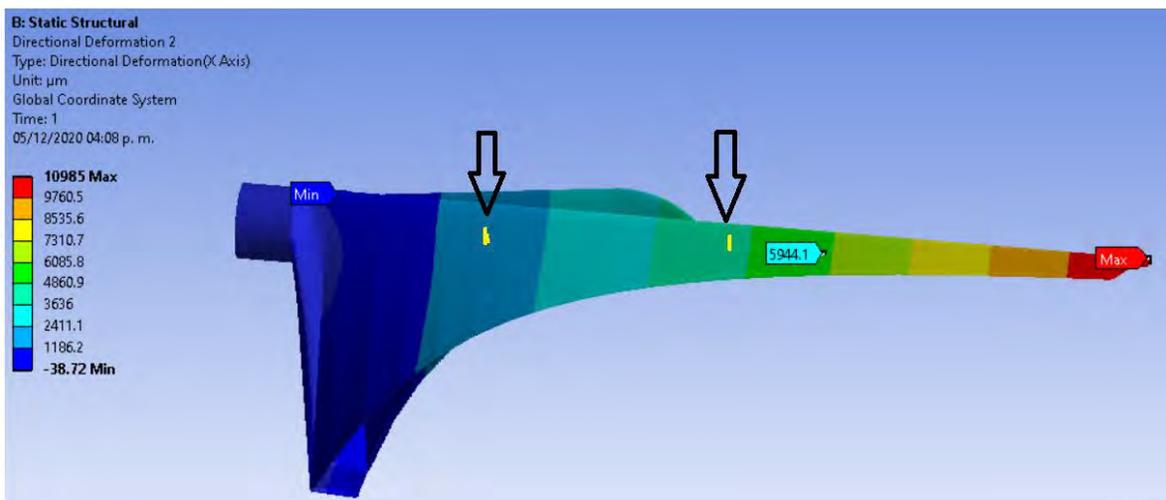


Imagen 84.- Galgas para pendiente.

He decidido colocarlas con esta carga ya que es la más crítica en cuanto a magnitud se refiere.

Como podemos observar, la simulación es un paso clave a la hora de saber dónde colocar las galgas, es importante recalcar una vez más que el módulo de Young utilizado en la simulación, es un módulo teórico [22] y para nada es el módulo real del aspa que vamos a someter a pruebas estructurales en laboratorio, eso nos lleva a que los resultados obtenidos mediante extensometría difieran de los valores obtenidos mediante simulación.

### 4.3 Instalación de galgas en aspa de doble raíz

Una vez terminado el curso y la instalación de galgas en un aspa de prueba, así como verificar su correcta instalación, se procedió a aplicar el procedimiento al aspa de doble raíz.

#### 4.3.1 Pegado de galgas

**Paso 1.- desengrasar:** este paso no aplica para el aspa, ya que solo aplica para superficies metálicas.

**Paso 2.- limpieza:** se utilizan gasas para limpiar la superficie (imagen 85).



Imagen 85.- Gasas secas para limpieza.

**Paso 3.- acondicionar:** se aplica acondicionador A sobre el área con la ayuda de una gasa (imagen 86).



Imagen 86.- Acondicionador A.

**Paso 4.- marcación de ejes:** se marcan los ejes con la ayuda de un lápiz 4H y una regleta con escuadra previamente esterilizados (imagen 87).

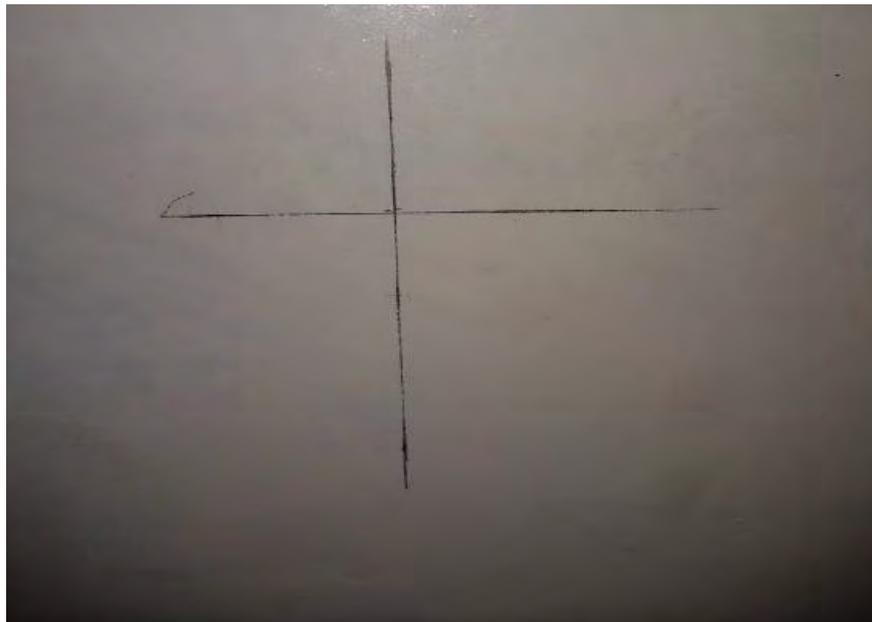


Imagen 87.- Marcación de ejes en la superficie a aplicar la galga.

**Paso 5.- neutralizar:** se aplica neutralizador sobre la superficie marcada previamente (imagen 88).



Imagen 88.- Neutralizador 5A.

**Paso 6.- lijar:** se lijaron 10 superficies para galgas, lijando en la dirección axial o perpendicular al aspa, de acuerdo al modo de carga que se desea analizar. Se lija hasta que se vea la fibra de vidrio y se elimine todo el Gel Coat que cubre al aspa. Ver imagen 89.



Imagen 89.- Superficie lijada lista para instalar la galga extensométrica.

**Paso 7.- manipulado de la galga:** con la ayuda de las pinzas antiestáticas (previamente esterilizadas) colocamos la galga en una superficie previamente esterilizada.

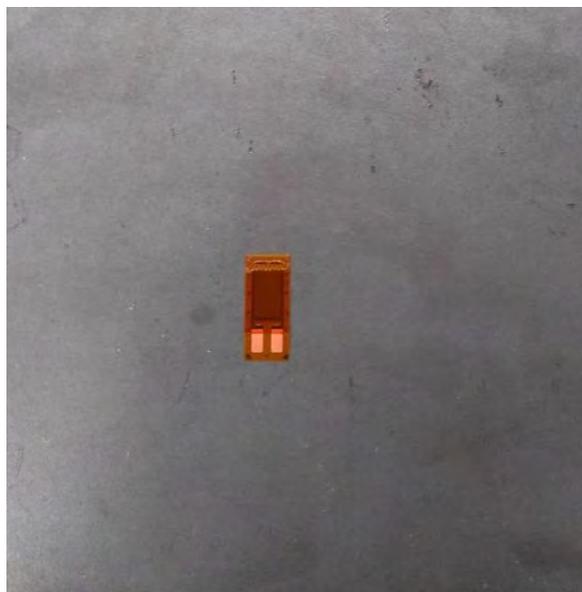


Imagen 90.- Galga en superficie esterilizada.

**Paso 8.- ubicación de la galga:** con la ayuda de la cinta PCT-2M ubicamos la galga en la superficie previamente lijada, acondicionada y esterilizada. La centramos con la ayuda de los ejes previamente trazados.



Imagen 91.- Galga posicionada.

**Paso 9.- colocación del catalizador:** se coloca el catalizador en la superficie inferior de la galga y se deja secar.



Imagen 92.- Colocación del catalizador.

**Paso 10.- colocación del adhesivo:** colocamos una gota de adhesivo y procedemos a adherir la galga sobre la superficie.



Imagen 93.- Colocación del adhesivo.

**Paso 11.- secado:** una vez adherido, hacemos presión con el dedo sobre el área de la galga durante 2 minutos. Dejamos la cinta sobre la galga por 20 minutos más,

una vez transcurrido este tiempo retiramos la cinta a 180° con fuerza para verificar su perfecta adherencia.

### **4.3.2 Soldado de galgas**

A continuación, procedemos a soldar las galgas en el aspa de doble raíz.

**Paso 1.-** colocamos dos puntos de soldadura en las terminales de la galga cuidando que no se toquen.



Imagen 94.- Colocación de los puntos de soldadura en la galga.

**Paso 2.-** se preparan los cables agregando soldadura a las puntas para reforzarlas y para su mejor manejo.



Imagen 95.- Preparación de los cables.

**Paso 3.-** soldamos el extremo de dos puntas del cable a las dos terminales de la galga.

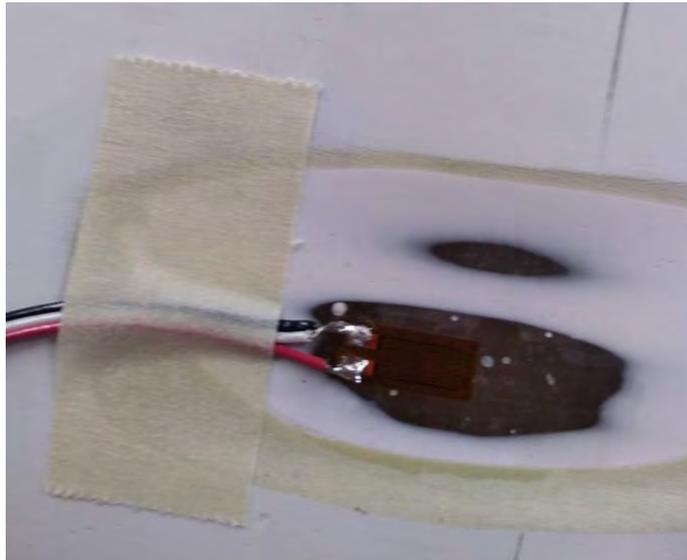


Imagen 96.- Puntas soldadas a terminales de la galga.

**Paso 4.-** por último, hacemos un doblé para asegurar que las terminales no se desuelden y se agrega Gel Coat para proteger la galga del ambiente.

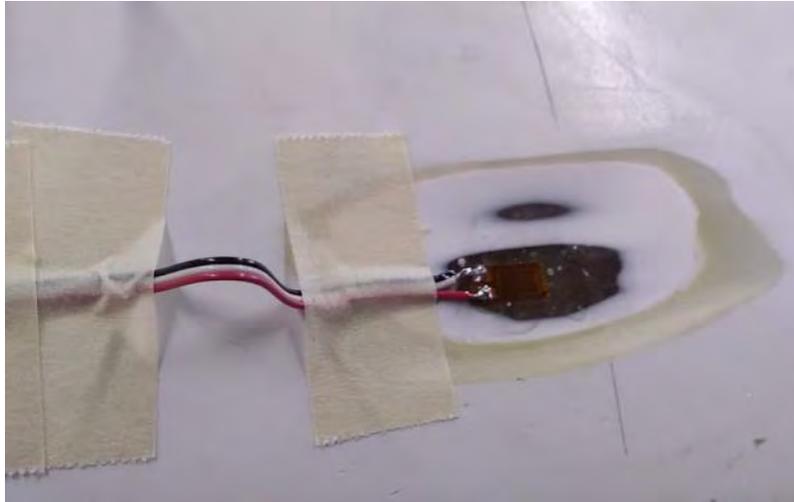


Imagen 97.- Doble de seguridad.

#### **4.4 Experimentación**

Para llevar a cabo las pruebas de laboratorio se elaboró un plan experimental, en el cual se analizaron todas las variables que afectan el experimento, tales como temperatura de galga, temperatura ambiente, humedad, tiempo de carga, tiempo de reposo del aspa, etc, así como también la muestra representativa, los instrumentos a utilizar y el método de recolección de datos.

##### **4.4.1 Metodología**

A continuación, en la siguiente imagen se muestra el diagrama de flujo con la metodología desarrollada a seguir para llevar a cabo las pruebas de laboratorio:

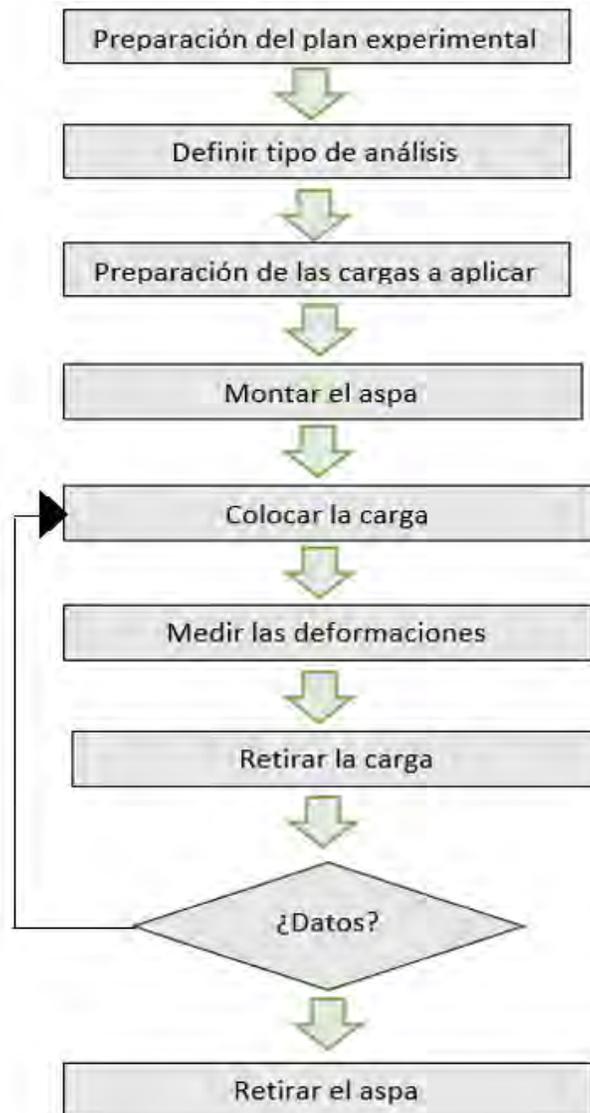


Imagen 98.- Metodología del experimento.

#### 4.4.2 Pruebas de laboratorio

La cantidad de pruebas por modo de carga, fue de 30, dividiéndolas en 2 días, es decir, 15 pruebas un día y 15 el otro, esto con la finalidad de evitar la fatiga en el aspa de doble raíz.

##### 4.4.2.1 Hipótesis A: Flapwise

La imagen 99 muestra la ubicación de las galgas en el aspa de doble raíz para el modo Flapwise, así mismo, la tabla 8 muestra la distancia y el lugar de cada galga en el aspa.



Imagen 99.- Ubicación de las galgas para el modo Flapwise

Ubicación	Distancias al empotramiento
Galga A; extradós raíz principal	10 cms
Galga B; intradós doble raíz	1.85 m
Galga C; extradós doble raíz	1.85 m
Galga D; intradós raíz principal	2.62 m

Tabla 8.- Posición y ubicación de las galgas para el modo Flapwise.

Por último, la tabla 9 resume las condiciones de carga, tiempo y variables a sensor para este modo.

Carga a aplicar	Tiempo de carga	Tiempo de reposo	Variables a sensor
52.2 kg	2 minutos	10 minutos	Temperatura de galga, temperatura ambiental y humedad

Tabla 9.- Resumen de las condiciones y variables a sensor, para la Hipótesis A: Flapwise.

#### 4.4.2.2 Hipótesis A: Edgewise

A continuación, se muestra la ubicación de las galgas para el modo Edgewise, así como la tabla que resume la ubicación y posición de las mismas.

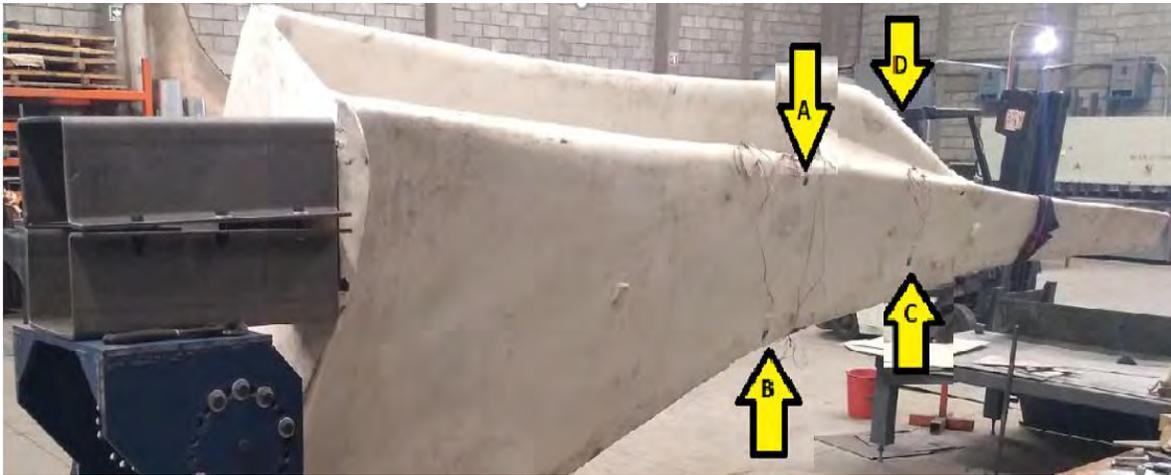


Imagen 100.- Ubicación de las galgas para el modo Edgewise.

Ubicación	Distancias al empotramiento
Galga A; intradós raíz principal	1.70 m
Galga B; intradós raíz principal	1.70 m
Galga C; intradós raíz principal	2.40 m
Galga D; extradós doble raíz	2.40 m

Tabla 10.- Posición y ubicación de las galgas para el modo Edgewise.

La siguiente tabla resume las condiciones de carga, tiempo y variables a sensar para este modo.

Carga a aplicar	Tiempo de carga	Tiempo de reposo	Variables a sensar
11.8 kg	2 minutos	5 minutos	Temperatura de galga, temperatura ambiental y humedad

Tabla 11.- Resumen de las condiciones y variables a sensar, para la Hipótesis A: Edgewise.

#### 4.4.2.3 Hipótesis H: Edgewise

Las galgas a utilizar serán las mismas que en la Hipótesis A: Edgewise (ver imagen 100 y tabla 10), lo que cambia es la magnitud de la carga y el tiempo de reposo, lo cual se resume en la siguiente tabla.

<b>Carga a aplicar</b>	<b>Tiempo de carga</b>	<b>Tiempo de reposo</b>	<b>Variables a sensor</b>
93.6 kg	2 minutos	10 minutos	Temperatura de galga, temperatura ambiental y humedad

Tabla 12.- Resumen de las condiciones y variables a sensor, para la Hipótesis H:  
Edgewise

#### 4.4.2.4 Desarrollo del experimento

El experimento consiste en colocar la carga (imagen 101) con ayuda de un gato hidráulico, dejar la carga durante 2 minutos, sensor las variables de temperatura ambiental, temperatura de galga y humedad con la ayuda de una pistola infrarroja (imagen 102), a los dos minutos tomamos lectura de las microdeformaciones del Indicador de tensión y registrador P3 para las 4 galgas y las registramos en una tabla de Excel para su posterior tratamiento estadístico (imagen 103). Por último, levantamos la carga con la ayuda del gato hidráulico y esperamos el tiempo de reposo correspondiente al modo de carga y repetimos el experimento.



Imagen 101.- Carga colocada para la Hipótesis A: Flapwise.

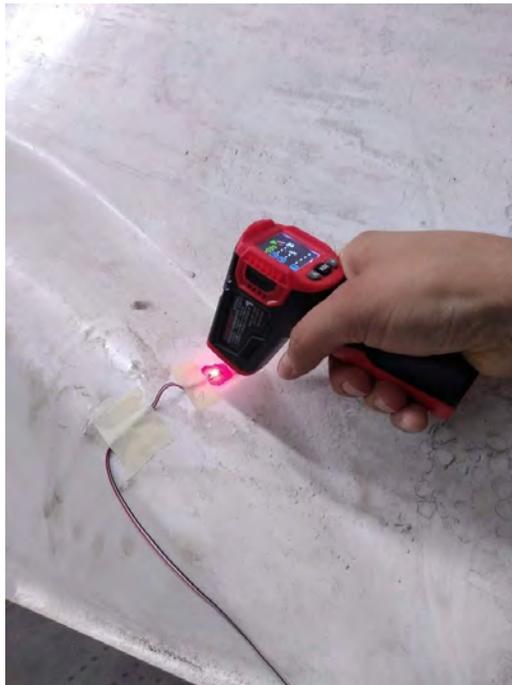


Imagen 102.- Sensado de variables.



Imagen 103.- Lectura y registro de las microdeformaciones.

#### 4.4.3 Resultados

A continuación, se resumen los resultados estadísticos para cada modo de carga para cada día correspondiente.

##### Resultados para la Hipótesis A: Flapwise:

Hipótesis de carga A: Flapwise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ( $\mu\epsilon$ )	121.44	48.73	-366.06	-407.6
Moda ( $\mu\epsilon$ )	124	47	-365	-407
Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )	4.43	2.52	4.39	4.33
Coefficiente de variación	3.65	5.17	1.20	1.06

Tabla 13.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

Hipótesis de carga A: Flapwise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ( $\mu\epsilon$ )	119.78	49.64	-359.78	-407.92
Moda ( $\mu\epsilon$ )	123	52	-357	-404
Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )	4.04	2.30	5.92	6.66
Coefficiente de variación	3.37	4.64	1.64	1.63

Tabla 14.- Resultados para el día 2, se realizaron 14 mediciones.

### Resultados para la Hipótesis A: Edgewise:

Hipótesis de carga A: Edgewise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ( $\mu\epsilon$ )	-2.73	20.93	12.13	2.86
Moda ( $\mu\epsilon$ )	-3	21	12	3
Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )	0.59	0.45	0.51	0.74
Coefficiente de variación	21.71	2.18	4.25	25.92

Tabla 15.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

Hipótesis de carga A: Edgewise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ( $\mu\epsilon$ )	-2.93	21.06	12.13	2.8
Moda ( $\mu\epsilon$ )	-3	21	12	3
Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )	0.59	0.45	0.35	0.67
Coefficiente de variación	20.23	2.17	2.89	24.14

Tabla 16.- Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

**Resultados para la Hipótesis H: Edgewise:**

Hipótesis de carga H: Edgewise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ( $\mu\epsilon$ )	-40.6	146.06	76.26	-9.93
Moda ( $\mu\epsilon$ )	-41	147	76	-10
Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )	1.68	3.32	2.96	1.66
Coefficiente de variación	4.14	2.27	3.88	16.78

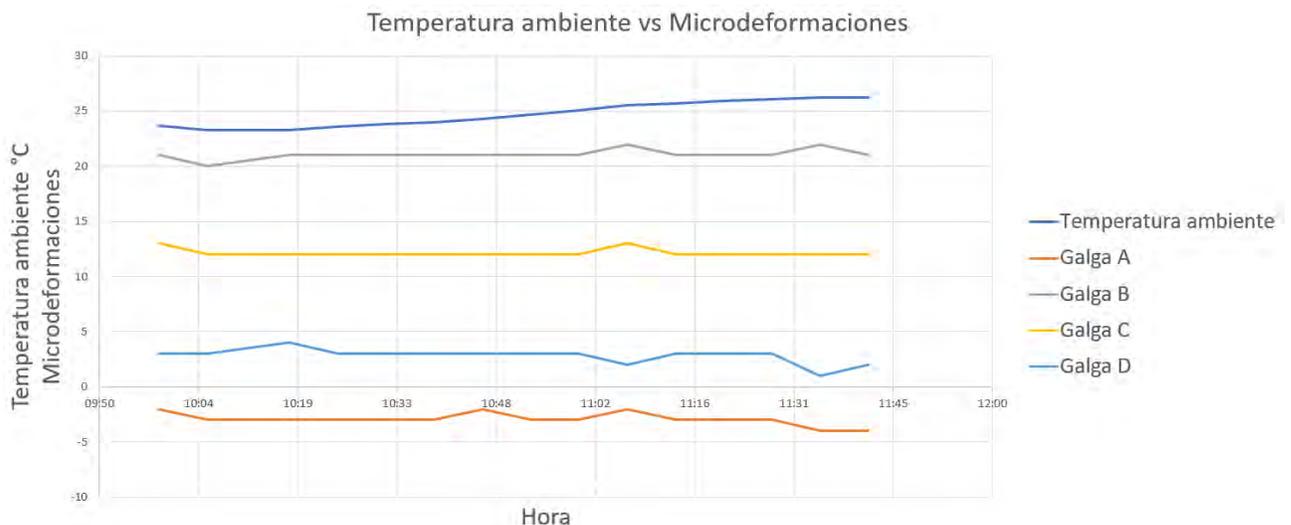
Tabla 17.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

Hipótesis de carga H: Edgewise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ( $\mu\epsilon$ )	-40.13	146.06	75.6	-9.73
Moda ( $\mu\epsilon$ )	-40	148	74	-6
Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )	2.92	2.76	2.52	2.43
Coefficiente de variación	7.28	1.89	3.34	25.01

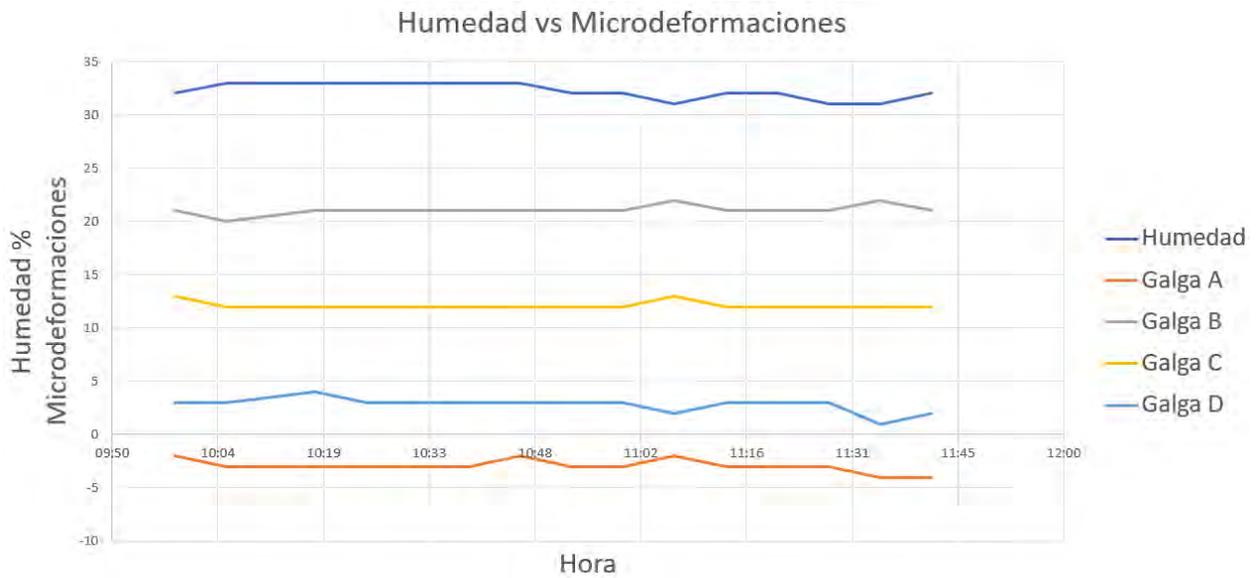
Tabla 18.- Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

#### 4.4.4 Conclusiones

Después de llevar a cabo las mediciones y analizar los datos estadísticamente, podemos darnos cuenta que la variable que más afecta al experimento es la humedad, y no la temperatura ambiental como se creía en un inicio. A continuación, se muestran las gráficas de temperatura ambiental vs microdeformaciones (gráfica 4) y humedad vs microdeformaciones (gráfica 5):



Gráfica 4.- Influencia de la temperatura ambiental en las mediciones.



Gráfica 5.- Influencia de la humedad en las mediciones.

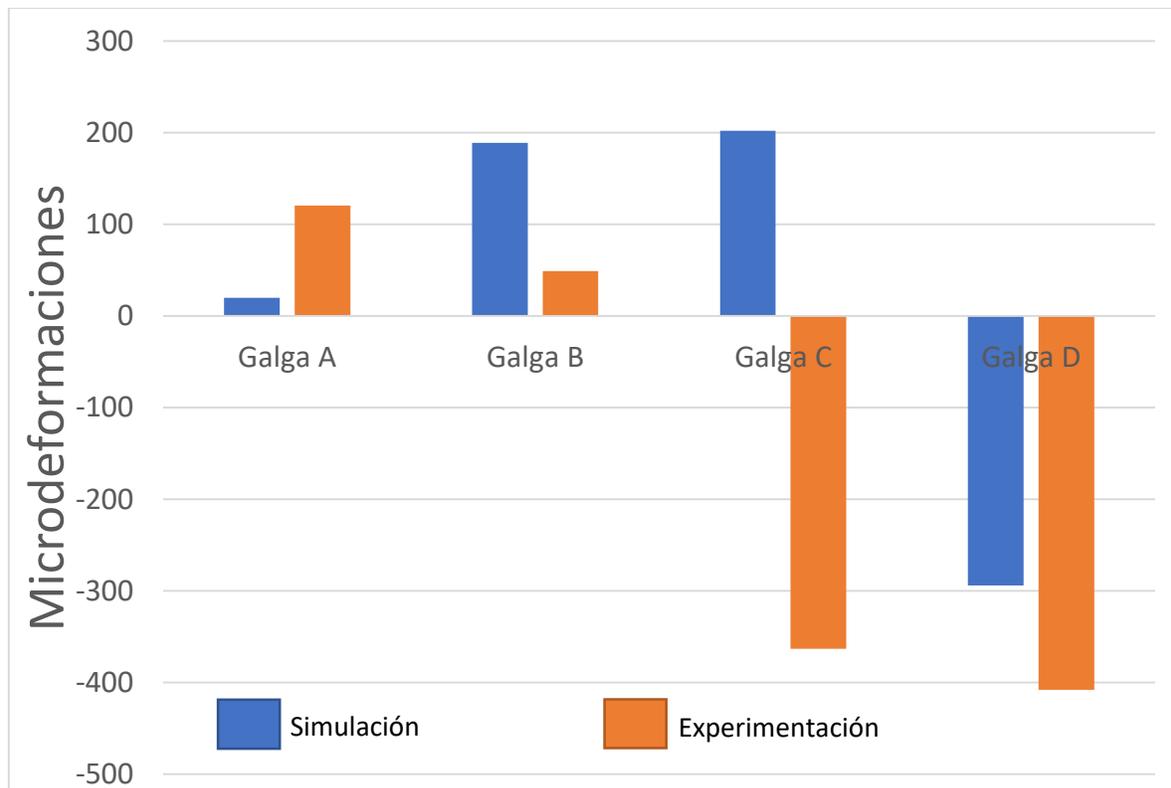
Como se puede apreciar en las gráficas anteriores, la variable que más influye en las mediciones es la humedad. Como se aprecia en la gráfica 5, la humedad y las microdeformaciones varían de manera inversamente proporcional, la única que se comporta de forma diferente es la galga D, esto se puede deber a que esa galga se encuentra en la doble raíz.

## CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Comparación de resultados obtenidos en la simulación y las mediciones

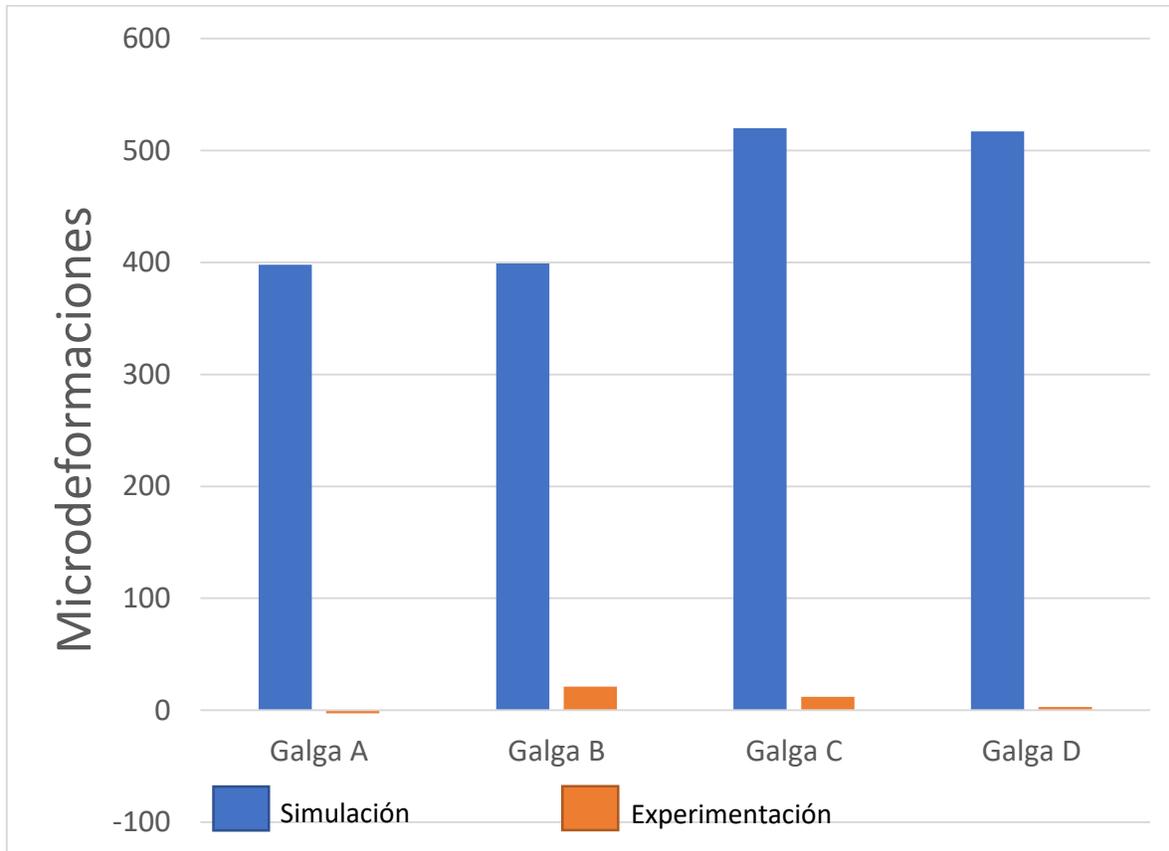
A continuación, se muestran las gráficas a manera de comparación entre las microdeformaciones obtenidas en la simulación y las obtenidas en las mediciones en laboratorio.

Primero tenemos la gráfica 6 para la hipótesis A: Flapwise, los valores obtenidos en simulación difieren un poco de los obtenidos en la experimentación, las galgas A, B y D tienen el mismo comportamiento en ambos casos (a tensión) salvo la galga C, que en la simulación arroja valores de tensión y en la experimentación arrojó medidas de compresión. Los valores más altos son obtenidos mediante la experimentación, salvo para la galga B que fue menor respecto a la simulación.



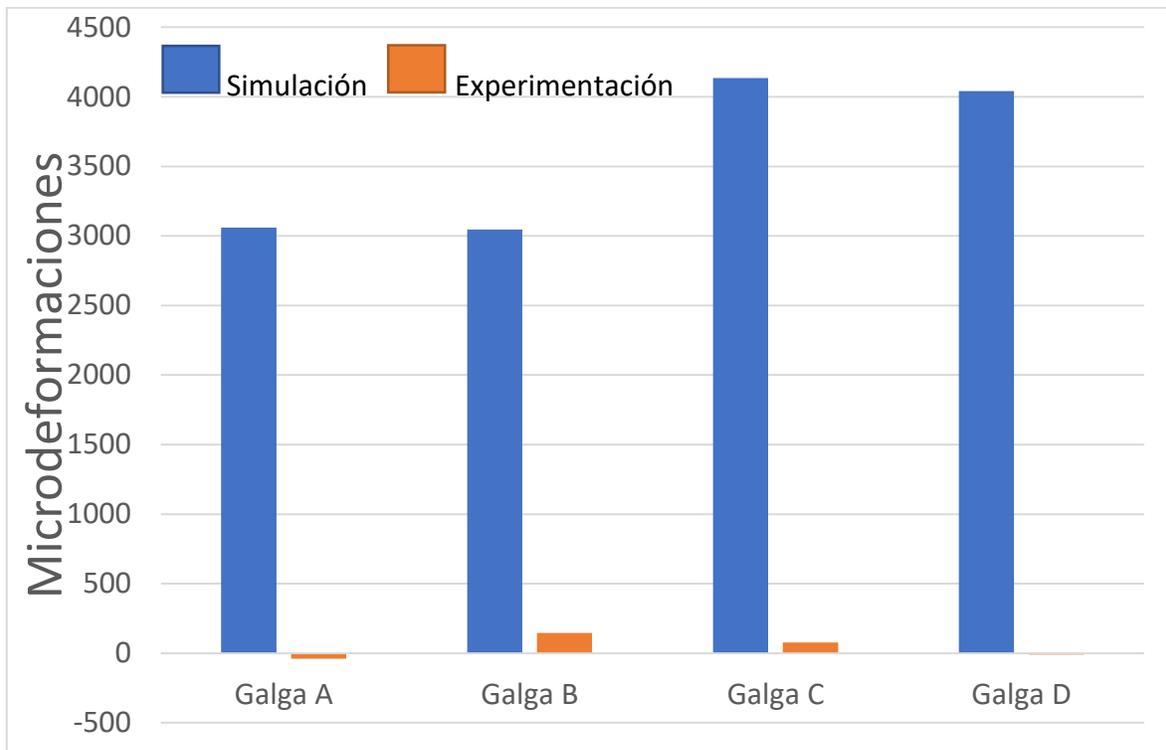
Gráfica 6.- Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y experimentación para la hipótesis A: Flapwise.

La gráfica 7 nos muestra los valores obtenidos para la hipótesis A: Edgewise, las galgas B, C y D, muestran el mismo comportamiento en ambos casos (tensión), pero los valores más altos son los obtenidos en la simulación, la galga A fue la única que se comportó de manera distinta, a tensión en la simulación y a compresión en la experimentación.



Gráfica 7.- Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y experimentación para la hipótesis A: Edgewise.

La gráfica 8 muestra los valores obtenidos para la hipótesis H: Edgewise, las galgas B y C tuvieron el mismo comportamiento en simulación y experimentación, las galgas A y D tuvieron un comportamiento distinto, a tensión en la simulación y a compresión en la experimentación. Los valores más altos fueron los obtenidos mediante simulación con una enorme diferencia.



Gráfica 8.- Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y experimentación para la hipótesis H: Edgewise.

Los valores obtenidos para los modos Edgewise tanto para la hipótesis A como la H fueron mucho más altos en la simulación que en las mediciones en laboratorio. Caso contrario para la hipótesis A: Flapwise donde 3 galgas presentaron valores más altos en las mediciones de laboratorio que los obtenidos mediante simulación. Esto se debe a la diferencia que existe entre la resistencia longitudinal de la transversal, ya que las láminas exteriores de fibra de vidrio/epoxi donde se instalaron las galgas están dispuestas a  $90^\circ$  y es justo donde se presenta mayor diferencia entre sus módulos longitudinal y transversal, ya que en las láminas dispuestas a  $45^\circ$  el módulo es exactamente el mismo.

Otra consideración de suma importancia es que el módulo de Young empleado en la simulación para la fibra de vidrio/epoxi difiere del módulo de Young real del aspa analizada, esto causa discrepancia entre los valores obtenidos con los distintos métodos. Habría que hacer una caracterización de la resina empleada para la fabricación del álabe pero por cuestiones de tiempo no fue posible.

## CONCLUSIONES

Fue posible realizar la simulación y ensayos estructurales a un álabe de doble raíz para una turbina de baja potencia empleando las hipótesis de carga que describe la norma IEC 61400-2. De acuerdo a los valores obtenidos tanto de esfuerzo mediante la simulación como de microdeformaciones obtenidas mediante extensometría, se puede concluir que el álabe es apto para trabajar en condiciones sin que se vea comprometida su integridad estructural.

Cabe destacar que, para este tipo de álabes de doble raíz a la hora de hacer los ensayos en modo Flapwise, hay que tener mucha precaución en la zona de unión de la doble raíz ya que es la que presento los mayores valores de microdeformaciones ( $-407.92 \mu\epsilon$ ), además, también presentó el esfuerzo máximo de Von Mises (86.135 MPa). Caso contrario en las hipótesis a Edgewise, donde prácticamente todo el esfuerzo lo presentó la raíz principal y los valores de microdeformaciones fueron de casi cero en la doble raíz tanto para la hipótesis A como la H.

Para el modo de carga de Hipótesis A: Flapwise, las galgas A y B, registraron mediciones de tensión, como era de esperarse de acuerdo a la simulación numérica, las galgas C y D registraron mediciones de compresión, de acuerdo a la simulación numérica, la galga C debería registrar mediciones de tensión, cosa que no sucedió, ambas galgas mostraron los valores más altos debido a la cercanía al punto de aplicación de la carga.

Para los modos de análisis Edgewise, las galgas A, B y C tuvieron el mismo comportamiento, tanto para la hipótesis A como la H, la galga D fue la única que se comportó de manera distinta, a tensión en la hipótesis A y a compresión en la H.

El coeficiente de variación es bajo en general (4.14, 7.28, 2.18, 2.89, etc) salvo en un par de ocasiones (25.92, 25.01, 24.14, etc) lo que nos indica que las pruebas se llevaron a cabo de manera homogénea y que hay repetibilidad en el experimento. Recordemos que un coeficiente de variación superior al 30% ya nos indica que tenemos un problema de repetibilidad en nuestro experimento.

Los valores de desviación estándar más altos se dieron para la Hipótesis A: Flapwise, donde se dieron los valores de deformación más altos, esto nos indica que, a mayores valores de deformación, mayor será la dispersión de los datos y viceversa.

La metodología aquí desarrollada para los ensayos estructurales de álabes de doble raíz en base a la norma IEC 61400-2 nos ayuda a garantizar la vida útil de este tipo de álabes en operación.

## Cronograma de actividades.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																								
Actividad	Semestre 1 2019-2020					Semestre 2 2020					Semestre 3 2020-2021				Semestre 4 2021									
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Búsqueda bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Clases	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Revisión del estado del arte	■	■	■	■	■																			
Planteamiento del problema	■	■	■	■	■																			
Modelado y simulación						■	■	■	■	■	■													
Pruebas de laboratorio																■	■	■	■	■				
Análisis de resultados													■	■	■	■	■	■	■	■				
Redacción de Tesis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Estancia													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Publicación de resultados																			■	■	■	■	■	■
Proceso de titulación																						■	■	■

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Global Wind Report 2020, Global Wind Energy Council, 2021.
- [2] JEAN-DANIEL, Pitteloud. Small Wind World Report 2017, World Wind Energy Association, 2017.
- [3] LOPEZ-GARZA, Víctor. et. al. Análisis preliminar estructural de un álabe de doble raíz de materiales compuestos para una turbina eólica de 3Kw. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2018. 5-17: 22-30.
- [4] LÓPEZ GARZA, Víctor. Diseño y manufactura de álabes de turbinas de viento de eje horizontal de baja capacidad para bajas velocidades de viento, CIATEQ, 2020.
- [5] MOLINERO HERNÁNDEZ, Daniel. Propuesta de diseño para la reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT, UMSNH, 2015.
- [6] CASILLAS FARFÁN, Christian Erik, Optimización del arranque de las turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad, UMSNH, 2016.
- [7] POURRAJABIAN, Abolfazl, NAZMI AFSHAR, Peyman Amir, AHMADIZADEH, Mehdi y WOOD, David. Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade, 2015.
- [8] WU, J.H. y LAI, F.M. Fatigue Life Analysis of Small Composite Sandwich Wind Turbine Blades. Procedia Engineering. enero 2011. Vol. 14, p. 2014–2020. DOI 10.1016/J.PROENG.2011.07.253.
- [9] MARIN TELLEZ, Paulina. Simulación y pruebas de laboratorio de un aspa de turbina de viento de 600 W de acuerdo a la Norma IEC-61400-2, UMSNH,2020.
- [10] L. Menegozzo, MONTE, A. Dal, E. Benini y A. Benato. Small wind turbines: A numerical study for aerodynamic performance assessment under gust conditions. 2018. Vol. 121, p. 123–132.

- [11] Monje, C. Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa guía didáctica, Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana, 2011.
- [12] PÉREZ JUÁREZ, Erick. Construcción de una máquina de ensayo a fatiga para álabes de aerogeneradores de baja capacidad. UMSNH, 2019.
- [13] J. F. MANWELL, J. G. MCGOWAN, A. L. ROGERS. Wind Energy Explained Theory, Design and Application, Second Edition. John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [14] BURTON, Tony, SHARPE, David, JENKINS, Nick y BOSSANYI, Ervin. Wind energy handbook. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [15] WOOD, David. Small Wind turbines, Analysis, Design, and Application. 2011.
- [16] Norma Europea EN 61400-2:2015, que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 61400-2, 2015.
- [17] SAEED, Moaveni. Finite element analysis: Theory and application with ANSYS. New Jersey, 1999. ISBN 0-13-785098-0.
- [18] SINGIRESU S., Rao. The finite element method in engineering. USA, 2011. ISBN: 978-1-85617-661-3.
- [19] DARYL L., Logan. A first course in the element finite method. USA, 2017. ISBN-13: 978-1-305-63511-1.
- [20] JOSÉ, I N G y OLMEDO, Fernando. Diseño de estructuras tipo cáscara basadas en materiales compuestos laminares. Escuela Politécnica Nacional, 2008.
- [21] CASTILLO SEBASTIÁN, Esmeralda. Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos, tesis Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [22] R.H. Barnes, E.V. Morozov, K. Shankar, Improved Methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades, Composite Structures 119, pg. 677-684, 2015.
- [23] ANSYS INC. ANSYS Composite PrepPost User's Guide. ANSYS Manual [online]. 2013. Available from: <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>

[24] SANDOVAL RODRÍGUEZ, Claudio Andrés. Clasificación y selección de strain gages y su aplicación en la industria mecánica. Universidad del BÍO-BÍO, 2013.

[25] SENSITEC S.A. de C.V. Extensometría Eléctrica, 2016.

[26] IDROVO URGILES, Pablo Xavier, QUINTANILLA MOLINA, Luis Miguel. Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas. Universidad Politécnica Salesiana, 2010.

## ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN Y PARTICIPACIÓN

Derivado del trabajo que se realizó en maestría se aprobó la publicación de un artículo para el Congreso Internacional Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática. A continuación, anexo la carta de aceptación.



### CONGRESO INTERNACIONAL INTERDISCIPLINARIO DE ENERGÍAS RENOVABLES, MANTENIMIENTO INDUSTRIAL, MECATRÓNICA E INFORMÁTICA., CIERMMI 2021.

27, 28 y 29 de Octubre de 2021.

San Juan del Río, Qro., Viernes 09 de Julio de 2021.

**Distinguido(a):** SANTIBAÑEZ-MALDONADO, Adrian, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SORIANO-PEÑA, Juan Felipe & MARIN-TELLEZ, Paulina.

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

Por medio de la presente me es grato hacer de su conocimiento que su investigación postulada en la convocatoria de Artículos Científicos con el título:

CÓDIGO	TÍTULO
CIER-003	<b><i>“PROPUESTA DE ENSAYOS ESTRUCTURALES DE ASPAS DE TURBINA DE VIENTO DE BAJA CAPACIDAD DE DOBLE RAÍZ CON BASE A LA NORMA IEC 61400-2.”</i></b>

Es **ACEPTADO PARA PUBLICACIÓN**, en las revistas indizadas que edita la empresa **ECORFAN MÉXICO S.C**, se le invita cordialmente a realizar las correcciones indicadas en el dictamen **“Peer Review Report”** y preparar su artículo en extenso de conformidad con el formato del Research Témplate, la fecha para enviar su artículo corregido, inicia a partir de la fecha de la presente carta de aceptación y culminará el día viernes 03 de septiembre de 2021.

Se participó en el equipo que está solicitando la patente para unos discos inductores para una turbina de eje vertical.

	
<b>Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial</b>	
- Población, Estado y País: MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO	
<b>Solicitante 5</b>	
- Causahabiente	
- Nombre: Maria Guadalupe NAVARRO ROJERO	
- CURP: NARG770413MZSVJD01	
- Nacionalidad: MÉXICO	
- Domicilio: Calle PALMA LATANIA, Ext. 250, Int. 70, Col. PALMARES, C. P. 76127, Tel. 4421741197, E-mail maria.navarro@ciateq.mx	
- Población, Estado y País: QUERÉTARO, QUERÉTARO, MÉXICO	
<b>Solicitante 6</b>	
- Causahabiente	
- Nombre: Isaac HERNANDEZ ARRIAGA	
- CURP: HEAI790912HQTRRS00	
- Nacionalidad: MÉXICO	
- Domicilio: Calle AVENIDA SAN ROQUE, Ext. 257, Col. SAN GREGORIO, C. P. 76156, Tel. 4421131180, E-mail isaac.hernandez@ciateq.mx	
- Población, Estado y País: QUERÉTARO, QUERÉTARO, MÉXICO	
<b>Solicitante 7</b>	
- Causahabiente	
- Nombre: Adrian SANTIBAÑEZ MALDONADO	
- CURP: SAMA930303HMNLD05	
- Nacionalidad: MÉXICO	
- Domicilio: Calle CERVANDO TERESA DE MIER, Ext. 187, Col. JARDINES DE TORREMOLINOS, C. P. 58197, Tel. 4351007732, E-mail anbuadrian@gmail.com	
- Población, Estado y País: MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO	

MX/a/2021/000393

Se colaboró también en la publicación de 2 artículos, los cuales cito a continuación:

MARIN TELLEZ, Paulina, LOPEZ GARZA, Víctor, SANTIBAÑEZ MALDONADO, Adrian y GONZÁLEZ ÁVALOS, Gilberto. Simulación estructural por elemento finito de un álabe de material compuesto de una turbina de viento. Academia Journals. 2020.

MARIN TELLEZ, Gerardo Javier, LÓPEZ GARZA, Víctor, MARIN TELLEZ, Paulina, SANTIBAÑEZ MALDONADO, Adrián. Análisis CFD de Discos Inductores para VAWT. Revista de Simulación Computacional. 2021.

Por último, se participó con una ponencia en el ANSYS CONVERGENCE 2021.

## ANEXOS

### Anexo A Curso para pegado de galgas extensométricas en aspas de turbinas

Se tomó un curso para la correcta instalación de galgas extensométricas en superficies de aspas de turbinas eólicas, el cual fue impartido por la Maestra en Ciencias de la Ingeniería Paulina Marin Tellez.

Para el curso se necesitó del siguiente material que viene en el Kit de aplicación básico Tipo SAK-2 (imagen 104), el cual contiene los siguientes suministros:



Imagen 104.- Kit básico de aplicación básico Tipo SAK-2.

#### Suministros de limpieza de superficies

SCP-1 papel lija de silicio grano 220, 30mx25mm

SCP-2 papel lija de silicio grano 320, 30mx25mm

SCP-3 papel lija de silicio grano 400, 30mx25mm

CSM-3 Desengrasante en spray lata de 0.35 kg

GSP-1 Gasas sin esterilizar tipo esponja de 200 piezas

CSP-1 Cotton Swabs, paquete de 100 piezas

MCA-1, M-Prep Conditioner A, Líquido para acondicionar superficies, 1 botella (60 ml)

MN5A-1 M-Prep Neutralizer 5A, Líquido para neutralizar superficies, 1 botella (60 ml)

#### Herramientas de aplicación

PCT-2M cinta para instalar strain gages, 1 rollo (19mmX10m)

PDT-3 cinta para proteger strain gages, 1 rollo (19mmX10m)

Hsc-2 Pinzas para ejercer presión con apertura de 51mm (1 pieza)

SSH-1 Tijeras de disección

STW-1 Pinzas antiestáticas en punta

BTW-1 Pinzas antiestáticas sin punta

DPR-1 Dental Probe

SSC-1 Bisturí con navaja (1 pieza)

SSC-2 Navajas de remplazo (5 piezas)

SSS-2 Regleta con escuadra

DP-1 Lápiz punta 4-H

DWC-1 Pinzas de corte

NNP-1 Pinzas de punta

TFE- 1 Película de teflón, rollo de 0.08mmX25mmX15m

#### Adhesivos

M-Bond 200 kit, (Contiene: 1 botella de adhesivo de 28g y 1 botella de catalizador de 30 ml)

#### Suministros de soldadura

WES51 361A-20R-25 soldadura 1 rollo, 25 ft (7.6 m)

Rosin Solvent, líquido para limpiar strain gages, botella, 1 oz (30 ml)

#### Cables y recubrimientos

326-DFV cable conductor de 3 hilos (30 m)

134-AWP filamento de cobre (150 m)

CPF-AST terminales auxiliares para soldar, 1 caja (22 tiras)

M-Coat A recubrimiento, botella (30 ml)

A continuación, se describen los pasos para la preparación de la superficie donde se instalará la galga y a la vez se mostrarán las imágenes tomadas en el curso.

**Paso 1.- desengrasar:** desengrasar enteramente la zona de la instalación, mediante un disolvente. Solo aplica para materiales metálicos.

**Paso 2.- limpieza:** elimine los residuos de lija sobre la superficie con la ayuda de una gasa sin esterilizar.



Imagen 105.- Limpieza de la superficie.

**Paso 3.- acondicionar:** aplique acondicionador A sobre el área y limpie perfectamente con la ayuda de una gasa.



Imagen 106.- Aplicación del acondicionador 5A a la superficie.

**Paso 4.- marcación de ejes:** con un lápiz 4H traza los ejes de posicionamiento de la galga y elimina el grafico con la ayuda de un aplicador de madera, repite hasta que el aplicador se vea perfectamente limpio. **Nota:** todo el material que esté en contacto con la superficie debe ser neutralizado.



Imagen 107.- Trazado de ejes.

**Paso 5.- neutralizar:** después de acondicionar la superficie, humedezca con neutralizador, seque perfectamente con gasas.



Imagen 108.- Aplicado del neutralizador 5A a la superficie.

**Paso 6.- lijar:** unifique la superficie con papel lija de grano adecuado al tipo de superficie (220, 320, 400).



Imagen 109.- Lijado de superficie.

**Paso 7.- manipulación de la galga:** saque la galga de su estuche con la ayuda de pinzas antiestáticas previamente esterilizadas con una gasa (imagen 110). Coloque la galga sobre una superficie perfectamente neutralizada (imagen 111) y con la ayuda de la cinta PCT-2M transporte la galga a la posición deseada, levantándola con un ángulo aproximado de 45°.



Imagen 110.- Esterilización de pinzas y manipulación de galga.



Imagen 111.- Esterilización de cristal para manipulación de galga.



Imagen 112.- Cinta PCT-2M para transporte de galga.

**Paso 8.- ubicación de la galga:** posicione la galga centrado sobre la línea previamente marcada en el paso 4, con la ayuda de las flechas de centrado de la galga.



Imagen 113.- Ubicación de galga en zona a pegar.

**Paso 9.- colocación del catalizador:** aplique catalizador sobre la galga y deje secar.



Imagen 114.- Aplicación del catalizador.

**Paso 10.- colocación del adhesivo:** coloque una gota de adhesivo sobre el espécimen, posicione la cinta en sentido contrario y con la ayuda de una gasa ejerza presión para que la galga quede perfectamente adherida (imagen 115).



Imagen 115.- Aplicación del adhesivo sobre la galga.

**Paso 11.- secado:** una vez adherido, coloque el dedo sobre el área de la galga durante 2 minutos. Deje la cinta sobre la galga por 20 minutos más, una vez transcurrido este tiempo retire la cinta a 180° con fuerza para verificar su perfecta adherencia (imagen 116).



Imagen 116.- Retirado de la cinta.

### **Proceso de soldado de galga extensométrica.**

A continuación, se describe el proceso para soldar las galgas.

**Paso 1.-** se ponen dos puntos de soldadura en las terminales de la galga cuidando que no se toquen (imagen 117).



Imagen 117.- Colocación de los puntos de soldadura a la galga.

**Paso 2.-** se preparan los cables separando los tres en un extremo y dejando dos unidos en la otra como se aprecia en la imagen 118, además de agregar soldadura a las puntas para reforzarlas y para su mejor manejo.



Imagen 118.- Preparación de los cables.

**Paso 3.-** se suelda el extremo de dos puntas a las dos terminales de la galga (imagen 119).

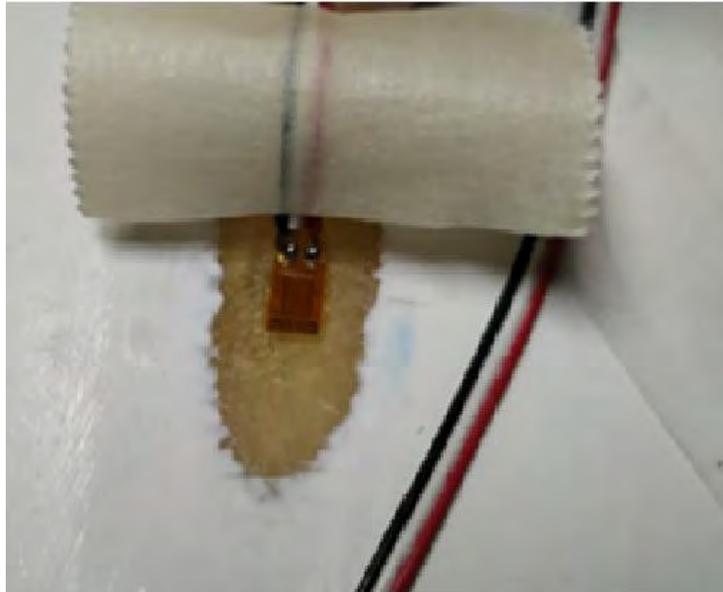


Imagen 119.- Puntas soldadas a terminales de la galga.

**Paso 4.-** por último, se hace un dobléz para asegurar que las terminales no se desuelden y se agrega Gel Coat (imagen 120).

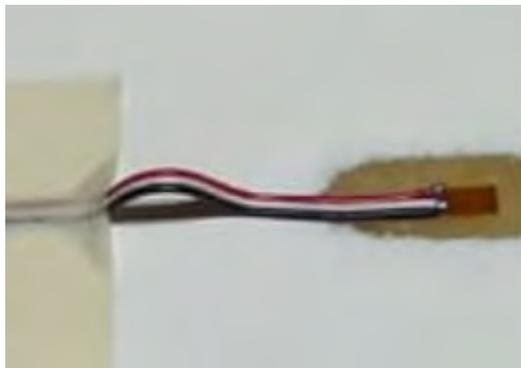


Imagen 120.- Doblez de seguridad.

Se instalaron 3 galgas más a manera de práctica, antes de hacer el procedimiento en el aspa de doble raíz, además de confirmar su correcta instalación mediante el Indicador de tensión y registrador modelo P3.

## Anexo B Parámetros para el cálculo de las hipótesis de carga

Parámetros para el cálculo de las hipótesis de carga.	
$A_{projB}$	1.45 [m <sup>2</sup> ]
$B$	3 [adimensional]
$C_D$	1.5 [adimensional]
$g$	9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
$m_B$	90 [kg]
$Q_{design}$	142 [N-m]
$R$	4.65 [m]
$R_{cog}$	0.917 [m]
$V_{e50}^2$	35 [m/s]
$\rho$	0.959 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda_{design}$	8 [adimensional]
$\omega_{n,design}$	8.58 [rad/s]
$\omega_{n,m\acute{a}x}$	27.4365 [rad/s]



# Anexo C Ficha técnica de la resina Epoxi



## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Fecha de emisión: 21/05/2018

Fecha próxima revisión: 21/05/2019

Versión que Sustituye:

Revisión.-

Sección 1. Identificación de la Sustancia Química peligrosa o mezcla y del proveedor o fabricante		
1.1 Nombre del producto:	RESINA POLIESTER INSATURADA	
1.2 Otros medios de identificación:	RESINAS POLIESTER	
1.3 Uso recomendado de la sustancia química peligrosa o mezcla, y restricciones de uso:	Resina poliéster insaturada utilizada en la manufactura de Plásticos Termofijos Reforzados.	
1.4 Distribuidor:	Poliformas Plásticas S. A. de C. V. Calzada Ignacio Zaragoza No. 448 Col. Federal, Del. Venustiano Carranza. Ciudad de México. CP.15700 Tel. (55) 5785 0430 Horario: 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes	
1.5 En caso de emergencia:	Poliformas: (55) 5785 0430 horario 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes SETIQ: 01 800 002 1400 (República Mexicana las 24 horas) 5559 1588 (Ciudad de México y área metropolitana) 011 52 5559 1588 (para llamadas originadas en otra parte)	
Sección 2. Identificación de los Peligros		
2.1 Clasificación de la sustancia química peligrosa o mezcla:	AROMÁTICOS.	
2.2 Elementos de señalización Sistema Globalmente Armonizado (SGA):	Pictograma de peligro.	
	Palabra de advertencia: PELIGRO	
2.3 Otros Peligros:	Información complementaria: (DLS0 CL50, etc): de acuerdo a la agencia internacional para la investigación de cáncer (IARC) incluye al Estireno como agente carcinógeno grupo 2B (posible carcinógeno para seres humanos)	
Sección 3. Composición / Información sobre los Componentes		
3.1 Sustancias:		
<b>Nombre del Ingrediente:</b>	<b># CAS</b>	<b>% en peso</b>
Resina poliéster insaturada	Mezcla	80-100
Monómero de Estireno	100-42-5	10-20
3.2 Mezclas:	No aplica	

Producto.- RESINA POLIESTER

Página: 1/7

## Sección 4. Primeros Auxilios

### 4.1 Descripción de los Primeros Auxilios:

<b>Contacto con los ojos</b>	Lavar inmediatamente con abundante agua limpia durante al menos 15 minutos, solicitar inmediata atención médica.
<b>Inhalación</b>	Trasladar a la víctima al aire fresco, mantener abrigada y tranquila, si no respira aplicar respiración artificial. Si la respiración es difícil, que el personal capacitado le aplique oxígeno. SOLICITAR INMEDIATA ATENCIÓN MÉDICA.
<b>Contacto con la piel:</b>	Lavar con jabón neutro y abundante agua durante al menos 15 minutos, cambiar la ropa contaminada, solicitar atención médica.
<b>Ingestión:</b>	NO INDUCIR VÓMITO, este material puede entrar a los pulmones durante el vómito, administrar uno o dos vasos de leche o agua a la víctima. Nunca administre algo por vía oral a una persona inconciente. SOLICITAR INMEDIATA ATENCIÓN MÉDICA.

### 4.2 Síntomas y efectos más importantes, agudos o crónicos:

<b>Contacto con los ojos:</b>	Nocivo para los ojos. El contacto directo con este material causa irritación ocular. Los síntomas pueden incluir picazón, lagrimeo, enrojecimiento e hinchazón.
<b>Inhalación:</b>	Nocivo si se inhala. Los efectos de la exposición pueden incluir dolores de cabeza, fatiga, náuseas, depresión del sistema nervioso central y edema pulmonar.
<b>Contacto con la piel:</b>	Nocivo si se absorbe a través de la piel. El contacto directo con este material causa irritación cutánea. El contacto repetido o prolongado con la piel puede ocasionar el desengrase y resecaimiento de la piel.
<b>Ingestión:</b>	Nocivo si se ingiere. La toxicidad de la dosis oral única es baja.

### 4.3 Signos/síntomas de sobreexposición:

Por exposición crónica: Se ha sugerido que una sobreexposición a concentraciones de este material (o a sus componentes) puede agravar desórdenes preexistentes en el sistema nervioso central, efectos sobre la audición y daño a las vías respiratorias. El estireno es irritante al aparato tracto-respiratorio y a los ojos. Puede ser fatal a concentraciones de 10,000 ppm.

## Sección 5. Medidas contra incendios

### 5.1 Medios de extinción apropiados:

#### Medios apropiados de extinción:

Utilice dióxido de carbono, espuma, químicos secos o nebulizador de agua para extinguir.

#### Medios no apropiados de extinción

No usar chorro de agua potente con el fin de evitar la dispersión y propagación del fuego.

### 5.2 Peligros específicos de la sustancia química peligrosa o mezcla:

Puede producir monóxido de Carbono, dióxido de Carbono, vapores tóxicos ó irritantes, gases y partículas.

### 5.3 Medidas especiales que deben seguir los grupos de combate contra incendio:

Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva.

## Sección 6. Medidas que deben Tomarse en caso de derrame o fuga Accidental

### 6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimiento de emergencia:

Para el personal de respuesta a emergencias:

- 1.- Usar ropa de protección para evitar el contacto repetido con el producto.
- 2.- Usar mascarilla de protección con filtro para vapores orgánicos ó equipo autónomo en caso de que no exista una buena ventilación en el área de trabajo.
- 3.- Usar Goggles ó la mascarilla del equipo autónomo.
- 4.- Usar guantes resistentes a sustancias químicas.
- 5.- En caso de incendio Utilizar Equipo completo de Bombero.

### 6.2 Precauciones ambientales:

Obedezca las referentes leyes y reglamentos locales, estatales, provinciales y federales. No contamine ningún lago, corriente, estanque, capa freática o suelo. No debe llegar a agua residual.

### 6.3 Métodos y materiales para la contención y limpieza de derrames o fugas

1. Evitar todas las fuentes de ignición.
2. Ventilar el área.
3. Colocar diques de retención al derrame.
4. Colectar el material y bombearlo a recipientes adecuados
5. Absorber con materiales inertes y disponer a confinamiento los residuos.
6. Toda persona que no lleve equipo de protección debe de salir del área del derrame.

## Sección 7. Manejo y Almacenamiento

### 7.1 Precauciones que se deben tomar para garantizar un manejo seguro:

Utilizar con una ventilación adecuada

### 7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas cualesquiera incompatibilidades:

Cerrar los recipientes herméticamente y mantenerlos en lugar fresco y seco.

## Sección 8. Controles de Exposición / Protección Personal

### 8.1 Parámetros de control:

Limites permisibles para estireno monómero:

LPP= 16 ppm (68 mg/m<sup>3</sup>)

LPT= 40 ppm (170 mg/m<sup>3</sup>)

### 8.2 Controles Técnicos apropiados:

Use sólo con ventilación adecuada y EPP adecuado.

### 8.3 Medidas de Protección Individual:

#### Medidas higiénicas:

Lave las manos, antebrazos y cara completamente después de manejar productos químicos, antes de comer, fumar y usar el lavabo y al final del período de trabajo. Usar las técnicas apropiadas para remover ropa contaminada. Verifique que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad se encuentren cerca de las estaciones de trabajo.

#### Protección ojos/cara:

Use gafas de seguridad con protectores laterales. En caso que se formen polvos use gafas protectoras muy ajustadas.

#### Protección de la piel y del cuerpo

Debe haber a la mano una ducha de seguridad y una fuente para lavado de ojos. Antes de utilizar este producto se debe seleccionar equipo protector personal para el cuerpo basándose en la tarea a ejecutar y los riesgos involucrados y debe ser aprobado por un especialista

#### Medidas de Protección

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. En caso de que exista la posibilidad de contacto con la piel o con los ojos, utilizar el equipo protector indicado para manos, ojos y para el cuerpo en general. Cuando se exceden los valores límites referidos al puesto de trabajo y/o en caso de liberación del producto debe emplearse el equipo respiratorio indicado.

Producto.- RESINA POLIESTER

Página: 3/7

**Protección respiratoria**

Use un respirador purificador de aire o con suministro de aire, que esté ajustado apropiadamente y que cumpla con las normas aprobadas si una evaluación de riesgo indica que es necesario. La selección del respirador se debe basar en el conocimiento previo de los niveles, los riesgos de producto y los límites de trabajo de seguridad del respirador seleccionado

**Ropa de protección:****Sección 9. Propiedades Físicas y Químicas****Apariencia:**

Estado físico.	Líquido Viscoso
Color.	100 Apha Máximo
Olor.	Aromático
Umbral del olor	No Disponible
pH	No Disponible
Temperatura de fusión	-30 °C (Estireno)
Temperatura de ebullición (760 mmHg)	145.2 °C (Estireno)
Punto de Inflamación	31.0 °C (Estireno)
Velocidad de evaporación.	No Disponible
Inflamabilidad (sólido, gas)	No Disponible
Límites máximo y mínimo de explosión (inflamabilidad)	Superior ( 6.8 % ) Inferior ( 0.9% )
Presión de vapor	4.5 mmHg
Densidad de vapor (aire=1)	3.6 (Estireno)
Densidad relativa	1.22 ± 0.02
Solubilidad.	Ligeramente soluble
Temperatura de auto ignición	490°C (Estireno)
Coefficiente de partición n-octano/agua	No Disponible
Temperatura de descomposición	No Disponible
Viscosidad @ 25° C (cps)	2200 ± 100
Peso molecular	1,000-25,000
Otros datos Relevantes	

**Sección 10. Estabilidad y Reactividad****10.1 Reactividad:**

Estable a condiciones normales de operación (25° C)

**10.2 Estabilidad química:**

**Estable :** 20-30 °C HR < 50%      **Inestable :** (>65°C + Ac. Fuerte ó Peróxido ó Agente Oxidante)

**10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas.**

Polimerización espontánea: Evitar exponer el producto a temperaturas elevadas (arriba de 40°C) e impedir la mezcla con peroxidos y agentes oxidantes.

**10.4 Condiciones que deben evitarse:**

Evitar altas temperaturas, fuentes de ignición como flama abierta, usar herramientas a prueba de chispas y equipos a pruebas de explosiones, no utilice recipientes o tuberías de cobre o que esten fabricadas con aleación del mismo.

**10.5 Materiales incompatibles:**

Ácidos fuertes, peróxido y agentes oxidantes

**10.6 Productos de descomposición peligrosos:**

Puede producir vapores toxicos ó irritantes, gases y partículas.

## Sección 11. Información Toxicológica

### 11.1 Información sobre las posibles vías de ingreso.

<b>Contacto con los ojos:</b>	Causa irritación ocular, los síntomas pueden incluir picazón, lagrimeo, enrojecimiento e hinchazón.
<b>Inhalación</b>	Los efectos de la exposición pueden incluir dolores de cabeza, fatiga, náuseas, depresión del sistema nervioso central y edema pulmonar.
<b>Contacto con la piel:</b>	Nocivo si se absorbe a través de la piel, el contacto directo con este material causa irritación cutánea.
<b>Ingestión:</b>	La toxicidad de la dosis oral única es baja.

### 11.2 Síntomas relacionados con las características físicas, químicas y toxicológicas

<b>Contacto con los ojos.-</b>	Lagrimeo, enrojecimiento.
<b>Inhalación</b>	.- Irritación del tracto respiratorio, tos.
<b>Contacto con la piel</b>	.- Irritación, resequedad.
<b>Ingestión</b>	.- Irritante para la boca, la garganta y el estómago.

### 11.3 Efectos inmediatos y retardados, así como efectos crónicos producidos por una exposición a corto y largo plazo

Se ha sugerido que una sobreexposición a concentraciones de este material (o a sus componentes) puede agravar desórdenes preexistentes en el sistema nervioso central, efectos sobre la audición y daño a las vías respiratorias. El estireno es irritante al aparato tracto-respiratorio y a los ojos. Puede ser fatal a concentraciones de 10,000 ppm.

### 11.4 Medidas numéricas de toxicidad (tales como estimaciones de toxicidad aguda)

Corto plazo Inhalación	289 mg/m <sup>3</sup>
Corto plazo Inhalación	306 mg/m <sup>3</sup>

### 11.5 Efectos interactivos

No disponibles

### 11.6 Cuando no se disponga de datos químicos específicos

Ninguna observación adicional.

### 11.7 Mezclas

No hay datos disponibles

### 11.8 Información sobre la mezcla o sobre sus componentes

El estireno puede producir efectos agudos y crónicos.

### 11.9 Otra información

De acuerdo a la agencia internacional para la investigación de cáncer (IARC) incluye al Estireno como agente carcinógeno grupo 2B (posible carcinógeno para seres humanos).

## Sección 12. Información Ecotoxicológica

### 12.1.- Toxicidad

La mezcla fue evaluada conforme al Reglamento (CE) nº 1272/2008 y resulta ser no peligrosa para el medio ambiente, aunque contiene sustancias peligrosas para el medio ambiente.

### 12.2.- Persistencia y degradabilidad

Datos no disponibles

### 12.3.- Potencial de bioacumulación

Datos no disponibles

### 12.4.- Movilidad en el suelo

Coefficiente de partición tierra/agua Log Kow (No disponible.)

## Sección 13. Información Relativa a la Eliminación de los Productos

### Métodos de eliminación

Los desperdicios se deben eliminar de acuerdo con los reglamentos federales, estatales, provinciales y locales.

Se debe reciclar o desechar el material de empaque de acuerdo con las disposiciones de las leyes federales, estatales y locales.

## Sección 14. Información Relativa al Transporte

### 1.- Número ONU

Transporte terrestre (ADR/RID):	1263
Transporte marítimo (IMDG):	1263
Transporte aéreo (IATA/ICAO):	1263

### 2.- Designación oficial del transporte

Transporte terrestre (ADR/RID):	PRODUCTOS PARA LA PINTURA
Transporte marítimo (IMDG):	PAINT RELATED MATERIAL
Transporte aéreo (IATA/ICAO):	PAINT RELATED MATERIAL

### 3.- Clases relativas al transporte

Transporte terrestre (ADR/RID):	3
Transporte marítimo (IMDG):	3
Transporte aéreo (IATA/ICAO):	3

### 4.- Grupo de embalaje/emvasado:

Transporte terrestre (ADR/RID):	III
Transporte marítimo (IMDG):	III
Transporte aéreo (IATA/ICAO):	III

### 5.- Riesgos Ambientales

Ninguno

### 6.- Precauciones especiales para el usuario

- Almacenar en lugares frescos y secos ( $T < 25^{\circ}\text{C}$  y % Hr = 50 +/- 10%).
- Evitar el contacto con luz solar.
- El manejo del producto debe ser con equipo de protección adecuado.
- No dañar los contenedores aún estando vacíos, ya que pueden contener residuos de producto (líquido y/o vapor)
- no presurizar, cortar, soldar, perforar.
- Los recipientes vacíos se deben drenar completamente y cerrar con el tapón original.

Producto.- RESINA POLIESTER

Página: 6/7

## Sección 15. Información Reglamentaria

15.1.- Disposiciones específicas sobre seguridad, salud y medio ambiente para las sustancias químicas peligrosas o mezclas de que se trate.

NOM-018-STPS-2015, NOM-010-STPS-1999, NOM-004-SCT/200, NOM-005-SCT/200

## Sección 16. Otra información incluida

GUIA DE RESPUESTA EN CASO DE EMERGENCIA 2004, POKED GUIDE TO CHEMICAL HAZARDS, HOJAS DE SEGURIDAD DE PROVEEDORES.

### Explicación de Abreviaturas

**ETA** = Estimación de Toxicidad Aguda  
**FBC** = Factor de Bioconcentración  
**SGA** = Sistema Globalmente Armonizado  
**IATA** = Asociación de Transporte Aéreo Internacional  
**IBC** = Contenedor Intermedio para Productos a Granel  
**IMDG** = Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas  
**Log Kow** = logaritmo del coeficiente de reparto octanol/agua  
**MARPOL** = Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación Por los buques, 1973 con el Protocolo de 1978. ("Marpol" = polución marina)  
**ONU** = Organización de las Naciones Unidas

### Referencias

- 1) Transportation of Dangerous Goods Act- "Reglamento concerniente a las mercancías peligrosas así como a la manipulación, la solicitud de transporte y al transporte mismo de mercancías peligrosas". Extracto de la Gazette de Canadá parte II.
- 2) Gazette de Canadá parte II, Ley sobre productos peligrosos, "Lista de divulgación de los ingredientes".
- 3) Ficha descriptiva del fabricante.
- 4) 29 CFR 1910.1000 Z. Tablas.
- 5) ACGIH 2000 Valores límite umbral (TLV) para productos químicos y agentes físicos.
- 6) Registro de efectos tóxicos de sustancias químicas (RTECS).
- 7) Código de reglamentación de California Propuesta 65.

La información incluida en el presente documento es proporcionada de buena fe y sin garantía, representación, aliciente o permiso de ningún tipo, excepto que es verídica al mejor conocimiento de Especialidades Químicas Para el Poliéster S.A. de C.V. fue obtenida de fuentes fidedignas. La exactitud, adecuación y suficiencia de las precauciones de salud y seguridad aquí expuestas no pueden ser garantizadas, y el comprador es el único responsable de asegurar que el producto sea utilizado, manejado, almacenado y desechado en forma segura y de conformidad con las leyes federales, estatales, municipales y locales aplicables. Especialidades Químicas Para el Poliéster S.A. de C.V. no es responsable de ninguna pérdida, perjuicio o daño personal que sufra el comprador o terceras personas derivado o relacionado en forma alguna con el uso de la información incluida en esta hoja informativa.

Producto.- RESINA POLIÉSTER

Página: 7/7