

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ESTUDIO DE COMPROBACIÓN DEL DISEÑO DE LA HÉLICE, LA TORRE Y LA GÓNDOLA DE UN AEROGENERADOR TRIPALA DE 20 KW MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

Diego Fernando Flores Heredia

ASESOR: Dr. Rosendo Franco Rodríguez

CO-ASESOR: Mg. Herbert Yépez Castillo

Lima, Mayo del 2016

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal comprobar el diseño de la torre, la góndola y la hélice de un aerogenerador tripala de 20 kW y eje horizontal, empleando simulación numérica computacional mediante el software ANSYS. Se realizó el estudio aerodinámico de la hélice, obteniéndose el campo de presiones que actúa sobre la misma, así como el torque y la potencia que es capaz de transmitir. Con la distribución de presiones obtenida se procedió a realizar el análisis estructural de la hélice, obteniéndose un factor de seguridad de 1.3. Se determinaron también las frecuencias naturales y los modos de vibración de la hélice, observándose que no ocurrirá el fenómeno de resonancia. Posteriormente se realizó un análisis estático estructural de la torre bajo dos escenarios: posición de funcionamiento y posición inicial de izaje, el cual permitió obtener la distribución de esfuerzos y desplazamientos de la misma. A partir de estos resultados se tiene que la torre trabajaría con un factor de seguridad por resistencia no inferior a 1.3. Mediante un análisis de estabilidad se obtuvo el factor de pandeo de la torre, igual a 31. También se obtuvieron los modos de vibración de la torre y sus correspondientes frecuencias naturales, observándose que las frecuencias naturales están alejadas de la frecuencia nominal de trabajo. Mediante otro análisis estructural estático se obtuvieron los resultados de esfuerzos y desplazamientos para de los componentes de la góndola, que fueron analizados de forma individual y en conjunto. El factor de seguridad de estos componentes es superior a 1.2. Los estudios de simulación estructurales de la torre y góndola se verificaron a través de cálculos analíticos, comprobándose que los resultados son correctos. Los resultados obtenidos permiten concluir que el diseño propuesto por la empresa WAIRA, evaluado bajo las condiciones descritas en este documento, está apto para operar adecuadamente.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ESTUDIO DE COMPROBACIÓN DEL DISEÑO DE LA HÉLICE, LA TORRE Y LA GÓNDOLA DE UN AEROGENERADOR TRIPALA DE 20 kW MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL

ÁREA : Diseño # 337

PROPUESTO POR : Dr. Rosendo Franco Rodríguez

ASESORES : Dr. Rosendo Franco Rodríguez
Mg. Herbert Yépez Castillo

TESISTA : Diego Fernando Flores Heredia

CÓDIGO : 20100936

FECHA : 05 de Mayo de 2016



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Actualmente a nivel mundial se ha optado por la búsqueda de nuevas alternativas energéticas para reducir la contaminación ambiental y satisfacer la creciente demanda de energía. La empresa WAIRA, empresa peruana que desarrolla soluciones energéticas basada en el uso de energías renovables, en asociación con la PUCP y a través del Grupo INACOM, está ejecutando un proyecto para el diseño y construcción de un aerogenerador tripala de 20 kW y de eje horizontal. El presente trabajo forma parte del mencionado proyecto y tiene como propósito realizar un estudio estructural y modal de los componentes mecánicos más importantes del aerogenerador, utilizando para esto herramientas de simulación numérica computacional. Los componentes mecánicos que se considerarán en el estudio son la torre, la góndola y la hélice, los cuales serán diseñados y fabricados por la empresa WAIRA. Los resultados de la tesis permitirán comprobar el diseño propuesto por la empresa y contribuirán a la toma de decisiones de la misma.






PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**ESTUDIO DE COMPROBACIÓN DEL DISEÑO DE LA HÉLICE, LA TORRE Y
LA GÓNDOLA DE UN AEROGENERADOR TRIPALA DE 20 kW MEDIANTE
SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL**

Introducción

Capítulo 1. Estudio del estado del arte

Capítulo 2. Estudio aerodinámico, estructural y modal de la hélice

Capítulo 3. Estudio estructural y modal de la torre y góndola mediante simulación
numérica

Capítulo 4. Estudio analítico estructural y modal de la torre y góndola

Conclusiones

Recomendaciones

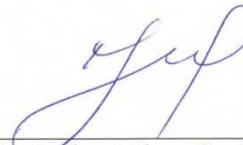
Bibliografía

Anexos

Máximo : 100 páginas



Dr. Rosendo Franco Rodríguez
Asesor



Mg. Herbert Yépez Castillo
Co-Asesor





DEDICATORIA

A mi madre y padre por toda la confianza y el apoyo que me brindaron

a lo largo de mis estudios universitarios.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores Rosendo Franco y Herbert Yépez por el apoyo en el desarrollo de la presente tesis. Además a mis compañeros Daniel Lavayen y Renato Yupa por todos los consejos y conocimientos que me brindaron en el transcurso de los últimos meses. De igual manera a todos mis amigos de Ingeniería Mecánica así como de otras carreras por todas las experiencias y momentos compartidos en el transcurso de mi vida universitaria que me han servido y seguirán haciéndolo en el transcurso de mi vida.



INDICE DE CONTENIDO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS.....	xix
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	2
Objetivos específicos	2
CAPITULO 1	3
ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE	3
1.1. Introducción	3
1.2. Energía eólica	3
1.3. Tipos de vientos	4
1.3.1. Vientos globales o geostróficos.....	4
1.3.2. Vientos locales.....	5
1.3.2.1. Brisas de la costa/mar.....	5
1.3.2.2. Brisas de montaña/valle.....	5
1.4. Aerogeneradores	6
1.4.1. Clasificación de los aerogeneradores.....	6
1.4.1.1. Según la orientación del viento	6
1.4.1.2. Según el sentido del eje del rotor	7
1.4.2. Partes de un aerogenerador	11
1.5. Fundamento teórico a aplicar	11
1.5.1. Mecánica de los Fluidos.....	12
1.5.1.1. Dinámica de Fluidos.....	12
1.5.1.2. Aerodinámica	14
1.5.2. Mecánica de materiales	15
1.5.2.1. Esfuerzo normal.....	16

1.5.2.2.	Esfuerzo cortante	17
1.5.3.	Dinámica	17
1.5.3.1.	Vibraciones	17
1.5.3.2.	Frecuencia natural	18
1.5.3.3.	Resonancia	18
1.6.	Herramientas computacionales	19
1.6.1.	Simulación numérica	20
CAPÍTULO 2		22
ESTUDIO AERODINÁMICO, ESTRUCTURAL Y MODAL DE LA HÉLICE		22
2.1.	Introducción	22
2.2.	Análisis aerodinámico de la hélice mediante simulación numérica	22
2.2.1	Etapa de pre – procesamiento	23
2.2.2	Etapa de procesamiento	26
2.2.3	Etapa de post – procesamiento	28
2.3.	Análisis aerodinámico de la hélice mediante método analítico	31
2.3.1	Análisis aerodinámico mediante la metodología BEM	31
2.4.	Análisis estructural de la hélice mediante simulación numérica	35
2.4.1	Etapa de pre – procesamiento	35
2.4.2	Etapa de procesamiento	38
2.4.3	Etapa de post – procesamiento	38
2.5.	Estudio estructural estático de la hélice mediante método analítico	39
2.6.	Análisis modal de la hélice mediante simulación numérica	40
2.6.1.	Etapa de pre – procesamiento	40
2.6.2.	Etapa de procesamiento	41
2.6.3.	Etapa de post – procesamiento	41
2.7.	Análisis modal de la hélice mediante método analítico	44
2.8.	Comparación de resultados	44

2.8.1	Comparación de resultados del análisis aerodinámico	44
2.8.2	Comparación de resultados del análisis estructural de la hélice	45
2.8.3	Comparación de resultado del análisis modal de la hélice	45
CAPÍTULO 3		46
ESTUDIO ESTRUCTURAL Y MODAL DE LA TORRE Y GÓNDOLA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA		46
3.1.	Introducción	46
3.2.	Análisis de la torre en posición de funcionamiento	47
3.2.1.	Análisis de la torre con carga de trabajo	47
3.2.1.1.	Etapa de pre – procesamiento	48
3.2.1.2.	Etapa de procesamiento	50
3.2.1.3.	Etapa de post – procesamiento.....	51
3.2.2.	Análisis de la torre con carga de viento.....	52
3.2.3.	Análisis de la torre con carga sísmica	54
3.2.4.	Análisis de la torre bajo diferentes combinaciones de cargas según método LRFD.....	56
3.2.5.	Análisis de estabilidad.....	58
3.2.6.	Cálculo de frecuencia natural de la torre	59
3.3.	Análisis de la torre en posición de izaje.....	60
3.3.1.	Cálculo de reacciones, desplazamientos y esfuerzos	60
3.3.1.1.	Etapa de pre – procesamiento	60
3.3.1.2.	Etapa de procesamiento	63
3.3.1.3.	Etapa de post – procesamiento.....	63
3.4.	Análisis estructural de la góndola mediante simulación numérica	65
3.4.1.	Análisis de ensamble de góndola.....	66
3.4.1.1.	Cálculo de desplazamientos y esfuerzos	66
3.4.2.	Análisis del eje principal.....	70
3.4.2.1.	Cálculo de reacciones, desplazamientos y esfuerzos	70

3.4.3.	Análisis del codo	74
3.4.3.1.	Cálculo de desplazamientos y esfuerzos	74
CAPÍTULO 4		78
ESTUDIO ANALÍTICO ESTRUCTURAL Y MODAL DE LA TORRE Y GÓNDOLA		78
4.1.	Introducción	78
4.2.	Estudio de la torre	78
4.2.1.	En posición de funcionamiento.....	78
4.2.1.1.	Cálculo de cargas actuantes	79
4.2.1.2.	Cálculo de esfuerzos.....	81
4.2.1.3.	Análisis de estabilidad.....	82
4.2.1.4.	Cálculo de frecuencias naturales	84
4.2.2.	En posición de izaje	86
4.2.2.1.	Cálculo de cargas actuantes	86
4.2.2.2.	Cálculo de esfuerzos.....	88
4.3.	Estudio de la góndola.....	89
4.3.1	Estudio del eje principal	89
4.3.1.1.	Cálculo de cargas actuantes	90
4.3.1.2.	Cálculo de esfuerzos.....	91
4.4.	Comparación de resultados	92
4.4.1.	Comparación de resultados de la torre en posición de funcionamiento ..93	
4.4.1.1.	Comparación de resultados de la torre por análisis de estabilidad ..93	
4.4.1.2.	Comparación de resultados de la torre por análisis modal	94
4.4.2.	Comparación de resultados de la torre en posición de izaje.....	94
4.4.3.	Comparación de resultados del eje principal	94
CONCLUSIONES		95
RECOMENDACIONES		97
BIBLIOGRAFÍA		98

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área transversal [m^2]
B	Número de palas [-]
C	Radio exterior [m]
C_d	Coefficiente de arrastre [-]
C_L	Coefficiente de sustentación [-]
C_n	Coefficiente normal [-]
C_t	Coefficiente tangencial [-]
$c(r)$	Cuerda local [m]
E	Módulo de elasticidad del acero [N/mm^2]
F	Fuerza de empuje aerodinámico [N]
F'	Factor de corrección de Prandtl [-]
F_{cf}	Fuerza centrífuga [N]
$F_{m1,2}$	Fuerza por el efecto gravitacional [N]
F_n	Fuerza resultante en dirección axial [N]
F_N	Fuerza normal [N]
F_p	Fuerza crítica de pandeo [N]
F_r	Masa de rueda [kg]
F_T	Fuerza tangencial [N]
H	Masa del eje principal [kg]
I	Radio de giro [m]
I	Momento de inercia [m^4]
I_P	Inercia polar [mm^4]
I_{xx}	Inercia en el eje x [mm^4]
I_{yy}	Inercia en el eje y [mm^4]
J	Momento polar de inercia [m^4]
J_{Total}	Momento de inercia de masa [$kg \cdot mm^2$]
K	Rigidez del resorte [N/m]
K	Factor de corrección de Glauert [-]
k_p	Rigidez de flexión de pala [N/m]
k_t	Rigidez torsional del eje del rotor [N.mm]
L	Longitud de cuerda [m]
L_p	Longitud de pandeo [m]
L_{pa}	Longitud de pala [mm]
M	Momento flector [N.m]
m_{eq}	Masa equivalente [kg]
m_p	Masa de pala [kg]

M_r	<i>Momento debido al giro de la hélice [N.m]</i>
P	<i>Peso de componentes de góndola y hélice [kg]</i>
Q	<i>Área superior o inferior [m²]</i>
Q_1	<i>Masa de soporte estator [kg]</i>
R	<i>Distancia del perfil con respecto del rotor [m]</i>
Re	<i>Número de Reynolds [-]</i>
R_m	<i>Radio medio [mm]</i>
T	<i>Ancho de sección [m]</i>
T	<i>Momento torsor total [N.m]</i>
V	<i>Fuerza cortante total [N]</i>
V_0	<i>Velocidad del viento [m/s]</i>
W	<i>Velocidad angular de giro del rotor [rad/s]</i>
ω_n	<i>Frecuencia natural [rpm]</i>
W	<i>Peso de componentes de torre [kg]</i>
W_n	<i>Frecuencia natural de la torre [Hz]</i>
Y	<i>Distancia del eje neutro al punto de análisis [m]</i>
a	<i>Factor de inducción axial [-]</i>
a'	<i>Factor de inducción rotacional [-]</i>
α	<i>Ángulo de ataque [°]</i>
B	<i>Ángulo de giro [°]</i>
M	<i>Módulo de Poisson del acero [-]</i>
Λ	<i>Esbeltez [-]</i>
λ_{FE}	<i>Esbeltez de Euler [-]</i>
P	<i>Densidad del acero [kg/m³]</i>
ϕ	<i>Ángulo de velocidad relativa [°]</i>
Σ	<i>Valor de solidez [-]</i>
$\sigma_{equivalente}$	<i>Esfuerzo equivalente [MPa]</i>
σ_F	<i>Esfuerzo de fluencia del acero [MPa]</i>
σ_m	<i>Esfuerzo normal debido a momento flector [N/m²]</i>
σ_n	<i>Esfuerzo normal debido a carga axial [N/m²]</i>
τ_c	<i>Esfuerzo cortante [N/m²]</i>
τ_t	<i>Esfuerzo cortante debido a momento torsor [N/m²]</i>

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.1. Mapa eólico del Perú.

Figura 1.2. Distribución de los vientos globales en el planeta.

Figura 1.3. Brisas de la costa/mar.

Figura 1.4. Brisas de montaña/valle.

Figura 1.5. Aerogenerador a barlovento.

Figura 1.6. Aerogenerador a Sotavento.

Figura 1.7. Rotor Savonius.

Figura 1.8. Aerogenerador Darrieus.

Figura 1.9. Aerogenerador para bombeo de Agua.

Figura 1.10. Aerogenerador Monopala.

Figura 1.11. Aerogenerador Bipala.

Figura 1.12. Aerogenerador tripala.

Figura 1.13. Partes de un aerogenerador.

Figura 1.14. Fenómeno de la capa límite.

Figura 1.15. Ley de Betz.

Figura 1.16. Flujo Laminar.

Figura 1.17. Flujo Turbulento.

Figura 1.18. Fuerzas aerodinámicas actuantes: de sustentación (drag) y arrastre (lift).

Figura 1.19. Fuerza de par y axial.

Figura 1.20. Esfuerzo axial a tracción y compresión.

Figura 1.21. Esfuerzo normal por momento flector.

Figura 1.22. Deformación por esfuerzo de torsión.

Figura 1.23. Vibración de péndulo simple.

Figura 1.24. Vórtice generado por las palas con contorno de presión sobre la superficie del rotor.

Figura 1.25. Presión, velocidad y líneas de corriente del aire.

Figura 1.26. Distribución de esfuerzo normal sobre la dirección de la matriz del material.

Figura 1.27. Procedimiento seguido en simulaciones numéricas.

CAPITULO 2

Figura 2.1. Modelo CAD de la hélice del aerogenerador.

Figura 2.2. Dominio del sistema. A) Rotativo. B) Estacionario.

Figura 2.3. Mallado de dominios. A) Dominio estacionario. B) dominio rotativo.

Figura 2.4. Efecto del comando inflation sobre el dominio rotativo.

Figura 2.5. Interfaz de contactos entre dominios rotativo (azul) y estacionario (verde).

Figura 2.6. Condiciones de borde en los dominios A) Estacionario. B) Rotativo.

Figura 2.7. Monitores de ANSYS SOLVER, A) Monitor de ecuaciones de movimiento y masa. B) Monitor de torque.

Figura 2.8. Campo de presiones (Pa) sobre la hélice.

Figura 2.9. Campo de presiones (Pa) en los dominios del sistema. A) Plano transversal al dominio estacionario. B) Detalle de variación de presión en pala.

Figura 2.10. Campo vectorial de velocidades sobre la pala.

Figura 2.11. Líneas de flujo de aire entrando y saliendo de la hélice. A) Vista isométrica. B) Vista lateral. C) Vista frontal.

Figura 2.12. Graficas de los coeficientes de arrastre y sustentación vs ángulo de ataque. A) Coeficiente de sustentación. B) Coeficiente de arrastre.

Figura 2.13. Modelo CAD de la hélice del aerogenerador.

Figura 2.14. Detalles del mallado de la hélice.

Figura 2.15. Condiciones de borde de la hélice.

Figura 2.16. Campo de presiones sobre la hélice.

Figura 2.17. Desplazamiento (mm) de la pala de la hélice.

Figura 2.18. Esfuerzos (MPa) sobre la pala de la hélice.

Figura 2.19. Factor de seguridad de la hélice.

Figura 2.20. Modos de vibración de la hélice para el caso 1.

Figura 2.21. Modos de vibración de la hélice para el caso 2.

Figura 2.22. Modos de vibración de la hélice para el caso 3.

CAPITULO 3

Figura 3.1. Modelo CAD de la torre para análisis en funcionamiento.

Figura 3.2. Elementos que conforman la torre. A) Base. B) Segmento base. C) Segmento intermedio. D) Segmento tope.

Figura 3.3. Mallado de la base de la torre.

Figura 3.4. Mallado del segmento base de la torre.

Figura 3.5. Mallado del segmento intermedio de la torre.

Figura 3.6. Segmento tope de la torre.

Figura 3.7. Condiciones de borde sobre la torre.

Figura 3.8. Desplazamiento (mm) de la torre.

Figura 3.9. Esfuerzos (MPa) sobre la torre.

Figura 3.10. Condiciones de borde sobre la torre con carga de viento.

Figura 3.11. Desplazamiento (mm) en sentido x sobre la torre sometida a carga de viento.

Figura 3.12. Esfuerzos (MPa) sobre la torre sometida a carga de viento.

Figura 3.13. Condiciones de borde sobre la torre sometida a carga sísmica.

Figura 3.14. Desplazamiento (mm) en la dirección x sobre la torre sometida a carga sísmica.

Figura 3.15. Esfuerzos (MPa) sobre la torre sometida a carga sísmica.

Figura 3.16. Desplazamiento (mm) de la torre en las diferentes combinaciones.

Figura 3.17. Esfuerzos (MPa) de la torre en las diferentes combinaciones.

Figura 3.18. Resultados del análisis por pandeo de la torre.

Figura 3.19. Resultados del análisis modal de la torre correspondiente al primer modo de vibración.

Figura 3.20. Modelo CAD de la torre para análisis en izaje.

Figura 3.21. Plano con las diferentes partes para el izaje de torre.

Figura 3.22. Modelo de la torre en ANSYS para el análisis en izaje.

Figura 3.23. Mallado de la base de la torre.

Figura 3.24. Mallado del segmento base de la torre.

Figura 3.25. Mallado del segmento intermedio de la torre.

Figura 3.26. Mallado del segmento tope de la torre.

Figura 3.27. Condiciones de borde sobre la torre en el izaje.

Figura 3.28. Desplazamiento (mm) de la torre en el izaje.

Figura 3.29. Esfuerzos (MPa) sobre la torre en el izaje.

Figura 3.30. Góndola ensamblada con sus principales partes.

Figura 3.31. Elementos para el análisis del ensamble de la góndola. A) Codo. B) Eje Principal. C) Rueda generador. D) Soporte estator.

Figura 3.32. Modelo del ensamble de la góndola en ANSYS.

Figura 3.33. Mallado de elementos de góndola. A) Codo. B) Eje principal.

Figura 3.34. Mallado de elementos de góndola. A) Soporte estator. B) Rueda generador. C) Góndola completa.

Figura 3.35. Condiciones de borde sobre la góndola.

Figura 3.36. Desplazamiento (mm) del ensamble de la góndola.

Figura 3.37. Esfuerzos (MPa) sobre la góndola.

Figura 3.38. Eje principal de la góndola.

Figura 3.39. Eje principal de la góndola en ANSYS.

Figura 3.40. Mallado del eje principal.

Figura 3.41. Eje principal de la góndola con condiciones de borde.

Figura 3.42. Desplazamientos (mm) en el eje principal de la góndola.

Figura 3.43. Esfuerzos (MPa) sobre el eje principal de la góndola.

Figura 3.44. Codo de la góndola.

Figura 3.45. Codo de la góndola en ANSYS.

Figura 3.46. Codo de la góndola con mallado.

Figura 3.47. Codo de la góndola con condiciones de borde.

Figura 3.48. Desplazamiento (mm) del codo de la góndola.

Figura 3.49. Esfuerzos (MPa) sobre el codo de la góndola.

CAPITULO 4

Figura 4.1. Dimensiones de los elementos que conforman la Torre. A) Longitudes de cada elemento. B) Secciones de cada elemento.

Figura 4.2. Diagrama de cuerpo libre de la torre.

Figura 4.3. Diagrama de cuerpo libre de la torre.

Figura 4.4. Dimensiones de sección empotrada en la base.

Figura 4.5. Torre para análisis por pandeo. A) Representación de torre como una barra empotrada en la base. B) Características promedio de la torre.

Figura 4.6. Longitud equivalente de pandeo del sistema empotrado – Libre.

Figura 4.7. Modelado de una estructura alta como un sistema de 1 grado de libertad.

Figura 4.8. Desplazamiento del punto A de la torre.

Figura 4.9. Posición de la torre en el izaje.

Figura 4.10. Diagrama de cuerpo libre de la torre en izaje.

Figura 4.11. Diagramas de fuerzas internas de la torre en el izaje.

Figura 4.12. Dimensiones de sección base a analizar.

Figura 4.13. Plano y sistema simplificado para estudio del eje principal.

Figura 4.14. Sistema representativo del eje principal con distribución de cargas actuantes.

Figura 4.15. Diagrama de cuerpo libre del eje principal.

Figura 4.16. Diagrama de fuerzas internas en el eje principal.

Figura 4.17. Dimensiones de sección base a analizar.

ANEXO 1

Figura A1.1. Detalles de elementos de torre. A) Base. B) Segmento Base. C) Segmento Intermedio. D) Segmento Superior.

Figura A1.2. Izaje de torre mediante puntal.

Figura A1.3. Elementos del ensamble de la turbina.

Figura A1.4. Perfil WORTMANN FX 60-126.

ANEXO 2

Figura A2.1. Perfil WORTMAN 60-126.

Figura A2.2. Estaciones de la pala y barrido en la modelación de la hélice.

Figura A2.3. Domo con unión para las palas.

ANEXO 4

Figura A4.1. Gráficas para el caso de velocidad 12 m/s y 120 rpm. A) Fuerza normal longitudinal vs longitud. B) Fuerza tangencial longitudinal vs longitud. C) Momento longitudinal vs longitud.

ANEXO 5

Figura A5.1. Ubicación del centroide.

Figura A5.2. Sección de la pala en el centroide.

Figura A5.3. Descomposición de fuerzas debido al peso de la pala.

Figura A5.4. Descomposición de fuerzas debido al peso de la pala.

Figura A5.5. Descomposición de fuerzas debido al peso de la pala.

Figura A5.6. Fuerzas y momentos resultantes sobre estación.

Figura A5.7. Fuerzas y momentos resultantes sobre estación.

ANEXO 6

Figura A6.1. Sistema sometido a fuerza provocadora de la vibración por flexión.

Figura A6.2. Sección de la estación número 12.

Figura A6.3. Sistema sometido a momento torsor.

ANEXO 8

Figura A8.1. Grafica de desplazamiento vs N° de nodos.

Figura A8.2. Grafica de esfuerzos vs N° de nodos.

ANEXO 9

Figura A9.1. Tabla de factores de forma, C.

Figura A9.2. Distribución de fuerzas debido a la carga del viento sobre la torre.

ANEXO 10

Figura A10.1. Criterios para seleccionar el valor del coeficiente de periodo fundamental, C_T .



LISTA DE TABLAS

CAPITULO 1

Tabla 1.1. Partes de un aerogenerador.

CAPITULO 2

Tabla 2.1. Características de la hélice del aerogenerador.

Tabla 2.2. Características del mallado.

Tabla 2.3. Condiciones para los diferentes casos analizados.

Tabla 2.4. Valores de los parámetros de la calidad de malla.

Tabla 2.5. Propiedades ortotrópicas de la fibra de vidrio.

Tabla 2.6. Valores de los modos de vibración y frecuencias naturales en el caso 1.

Tabla 2.7. Valores de los modos de vibrar y frecuencias naturales en el caso 2.

Tabla 2.8. Valores de los modos de vibrar y frecuencias naturales en el caso 3.

Tabla 2.9. Comparación de potencia obtenida en el análisis analítico y mediante simulación numérica del fenómeno aerodinámico.

Tabla 2.10. Comparación de esfuerzos máximos obtenidos en el análisis analítico y mediante simulación numérica en la sección crítica.

Tabla 2.11. Comparación de frecuencias naturales obtenidas en el análisis analítico y mediante simulación de la hélice.

CAPITULO 3

Tabla 3.1. Valores de los parámetros de la calidad de malla.

Tabla 3.2. Reacciones en la base de la torre.

Tabla 3.3. Reacciones en la base de la torre.

Tabla 3.4. Reacciones en la base de la torre

Tabla 3.5. Reacciones en la base de la torre.

Tabla 3.6. Valores de los parámetros de malla.

Tabla 3.7. Valores de los parámetros de malla.

Tabla 3.8. Valores de los parámetros de malla.

Tabla 3.9. Reacciones en zona considerada como apoyo fijo.

Tabla 3.10. Valores de los parámetros de la calidad de malla.

Tabla 3.11. Reacciones en zona considerada como apoyo fijo.

CAPITULO 4

Tabla 4.1. Características de la torre para el cálculo de frecuencias.

Tabla 4.2. Comparación de reacciones en la base hallados de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica.

Tabla 4.3. Comparación de desplazamiento y esfuerzo obtenidos de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica.

Tabla 4.4. Comparación de resultado de análisis por pandeo.

Tabla 4.5. Comparación de frecuencias naturales obtenidas de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica.

Tabla 4.6. Comparación de reacciones y esfuerzo obtenidos de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica en el Izaje.

Tabla 4.7. Comparación de resultados en la zona critica del eje principal.

ANEXO 1

Tabla A1.1. Masa de los elementos del aerogenerador.

ANEXO 2

Tabla A2.1. Resumen de parámetros de diseño por estación de cada pala.

ANEXO 3

Tabla A3.1. Torque, potencia y fuerzas para los diferentes casos analizados.

ANEXO 4

Tabla A4.1. Parámetros por estación en el caso nominal para el estudio analítico del análisis aerodinámico.

Tabla A4.2. Parámetros por estación en el caso nominal para el estudio analítico del análisis aerodinámico.

ANEXO 5

Tabla A5.1. Cargas y momentos en los ejes de coordenadas

Tabla A5.2. Parámetros necesarios en el cálculo de la fuerza centrífuga.

Tabla A5.3. Magnitud de fuerzas debido al efecto gravitacional.

Tabla A5.4. Magnitud de fuerzas debido al efecto aerodinámico.

Tabla A5.5. Fuerzas por efecto en cada pala en el centroide.

Tabla A5.6. Resultante de fuerzas sobre cada pala en el centroide.

Tabla A5.7. Fuerzas actuantes sobre estación en análisis.

Tabla A5.8. Parámetros geométricos de la sección.

Tabla A5.9. Esfuerzos en los puntos 1 y 2 debido a las cargas actuantes.

Tabla A5.10. Distancia del centroide a los puntos 1 y 2.

Tabla A5.11. Esfuerzos sobre los puntos 1 y 2.

Tabla A5.12. Esfuerzo total sobre los puntos 1 y 2.

Tabla A5.13. Esfuerzo equivalente sobre los puntos 1 y 2.

ANEXO 6

Tabla A6.1. Características de la sección de la estación 12.

Tabla A6.2. Características de la sección de la estación 12.

ANEXO 7

Tabla A7.1. Cargas para estudio de la torre y la góndola.

Tabla A7.2. Propiedades del acero estructural.

Tabla A7.3. Cargas actuantes en el eje principal.

ANEXO 8

Tabla A8.1. Variación de la desplazamiento y esfuerzo de la torre con el aumento del número de nodos.

ANEXO 9

Tabla A9.1. Valores de las fuerzas sobre la torre

ANEXO 10

Tabla A10.1. Factores de zona, Z.

Tabla A10.2. Tabla de categoría de edificaciones, U.

Tabla A10.3. Tabla de factores de suelo, S.

Tabla A10.4. Tabla de coeficientes de reducción, R.

INTRODUCCIÓN

Desde décadas pasadas las fuentes energéticas más utilizadas son aquellas que emplean combustibles fósiles como gas, petróleo o carbón; las cuales son la principal causa de grandes cantidades de emisiones contaminantes y consecuentemente del cambio climático que sufre el planeta. Actualmente a nivel mundial se ha optado por la búsqueda de nuevas alternativas energéticas para mitigar la contaminación ambiental, tales como las energías renovables convencionales (centrales hidroeléctricas) y las no convencionales (eólica, solar, geotérmicas, etc.). La energía eólica es una fuente de energía renovable e inagotable, considerada como una de las más eficientes, que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica. Una de las máquinas principalmente usada para captar la energía producida por las corrientes de viento son los aerogeneradores, los cuales se subdividen en dos tipos, los de traslación y los de rotación. Estos aerogeneradores se han desarrollado a través del tiempo y en la actualidad se trabaja principalmente con los de rotación con rotor de eje horizontal, ya que estos presentan una mayor eficiencia a la hora de convertir la energía del viento en energía útil.

En Perú el uso de energías renovables es promovido en gran medida por el estado; sin embargo, toda la energía generada no es suficiente para abastecer a todos los territorios del país, por lo que el uso de energía eólica es una gran alternativa para contrarrestar este problema. Por tal motivo, en el presente trabajo se pretende realizar la comprobación del diseño de la hélice, la torre y la góndola que conforman la estructura de un aerogenerador tripala de 20 kW de eje horizontal, modelo propuesto por la empresa WAIRA. Este modelo de aerogenerador trabajará a una velocidad de viento igual a 10 m/s y una velocidad rotacional de 120 rpm; además el modelo cuenta con una torre de 16 metros de longitud compuesta por 4 partes de acero las cuales son la base, el segmento base, el segmento intermedio y el segmento superior de sección variable como se aprecia en la figura A1.1 del Anexo 1. El diámetro máximo de estos elementos se ubica en la base teniendo un valor igual a 600 mm y el diámetro mínimo ubicado en la parte superior de 300 mm, además de una hélice con rotor de 12 metros de diámetro.

En la instalación del aerogenerador se considera un puntal el cual servirá para el izaje de la torre y la turbina en general. En la imagen A1.2 se muestra la posición inicial (horizontal) de la torre para el posterior izaje con ayuda del puntal mostrado en

posición vertical. Cabe resaltar que el conjunto de la turbina está compuesta por un codo, un soporte de estator, un eje principal, una bocamasa, la rueda de generador y las palas, todos estos elementos mostrados en la figura A1.3. Las palas utilizan perfiles WORTMANN FX 60-126, ver figura A1.4. En la tabla A1.1 se detallan las masas correspondientes de los diferentes elementos que conforman el aerogenerador. Finalmente, en el estudio se utilizará la simulación numérica computacional con ayuda del software ANSYS con sus respectivos módulos ANSYS MECHANICAL y ANSYS CFX, para que finalmente los resultados sean comparados y analizados con sus respectivos cálculos analíticos.

Objetivo General

- Comprobar el diseño de la hélice, la góndola y la torre de un aerogenerador tripala de 20 kW y de eje horizontal utilizando herramientas de simulación numérica computacional.

Objetivos específicos

- Definir un procedimiento analítico para obtener resultados referenciales del fenómeno aerodinámico, estructural y modal sobre la hélice del aerogenerador.
- Realizar el análisis aerodinámico, estructural y modal de la hélice mediante simulación numérica computacional.
- Definir un procedimiento analítico para obtener resultados referenciales del fenómeno estructural y modal sobre la góndola y torre del aerogenerador.
- Realizar el análisis estructural y modal de la góndola y torre mediante simulación numérica computacional.
- Comprobar los resultados obtenidos mediante la simulación numérica computacional a partir de los resultados referenciales hallados en el procedimiento analítico.
- Emitir recomendaciones sobre el diseño analizado y proponer posibles mejoras en los casos que sea factible.

CAPITULO 1

ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

1.1. Introducción

El presente capítulo abordará los temas relacionados con la energía eólica, los tipos de vientos, la clasificación y partes de los tipos de aerogeneradores. Además se explicará sobre la teoría fundamental relacionada con la mecánica de fluidos, la mecánica de materiales y dinámica aplicada, así como de las herramientas computacionales usadas.

1.2. Energía eólica

La energía eólica es una fuente de energía renovable producida por el viento, esta se obtiene de la energía cinética que se debe al efecto de las corrientes y de las vibraciones que el aire produce. Las corrientes de aire se generan a partir de diferencias de presión y temperatura en la atmósfera, las cuales son aprovechadas mediante el uso de equipos llamados aerogeneradores o más conocidos como turbinas eólicas. El principio básico de funcionamiento de estos equipos es que debido a su forma aerodinámica y forma geométrica permite convertir la energía cinética del viento en trabajo mecánico mediante el uso de un generador eléctrico. La energía a obtener dependerá del potencial eólico del lugar, para ello se trazan mapas eólicos en los que se aprecia las diferentes variaciones de viento según la localidad y con

respecto a la altura. En la figura 1.1 se aprecia el mapa eólico del Perú, en el que mediante una escala de colores se representa la variación de la velocidad del viento según la localidad a una respectiva altura.

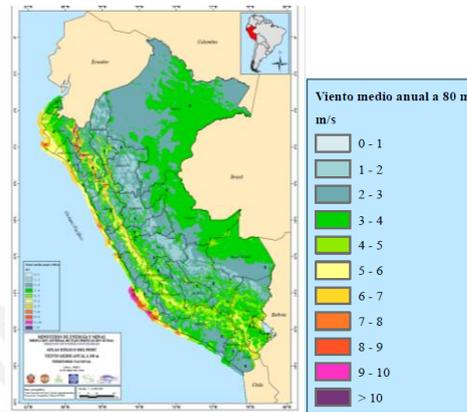


Figura 1.1. Mapa eólico del Perú. Fuente: <http://deltavolt.pe/atlas/eolico/viento-altura>

1.3. Tipos de vientos

Los tipos de viento se clasifican en base a la escala o dimensión de su recorrido y según esta clasificación se cuenta con 2 tipos de viento: los vientos globales o geostróficos y los vientos locales.

1.3.1. Vientos globales o geostróficos

Los vientos globales son aquellos que suben desde el Ecuador y se desplazan hacia el norte y hacia el sur en las capas más altas de la atmósfera. Alrededor de los 30° de latitud en ambos hemisferios la fuerza de Coriolis evita que el viento se desplaza más allá. En esta latitud se encuentra un área de altas presiones, por lo que el viento empieza a descender de nuevo así como en los polos debido al aire frío presente. En la figura 1.2 se aprecia la distribución de los vientos globales en color verde.

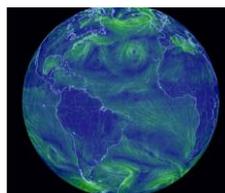


Figura 1.2. Distribución de los vientos globales en el planeta. Fuente: <http://earth.nullschool.net/#current/wind/surface/level/orthographic=-39.97,4.09,410>

1.3.2. Vientos locales

Los vientos globales son de gran importancia para la determinación de los vientos dominantes dentro de las diferentes zonas, sin embargo las condiciones locales pueden influir en las direcciones del viento. Existen casos en que los vientos globales son más suaves y las condiciones del viento pueden ser dominadas por los vientos locales. Las brisas de la costa/mar y de montaña a valle son tipos de vientos locales.

1.3.2.1. Brisas de la costa/mar

La capacidad que posee el mar y la tierra de calentarse es la principal causa de estas brisas. Por un lado, durante el día el sol calienta con mayor facilidad a la tierra que al agua, lo que provoca que el aire este más caliente por esta zona lo que conlleva a que el aire ascienda dejando un depresión a nivel del suelo que atrae el aire frío del mar generando así la brisa. En cambio, por la noche este fenómeno es el contrario, ya que el mar se encuentra más caliente que la tierra lo que provoca que el aire cercano al mar ascienda y genere nuevamente una depresión que atrae el aire de la tierra generando así la brisa. En la figura 1.3 se esquematiza lo antes mencionado sobre las brisas costa/mar.

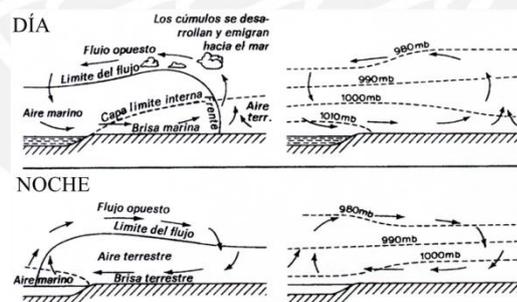


Figura 1.3. Brisas de la costa/mar. Fuente: http://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/4_vientos_locales.html

1.3.2.2. Brisas de montaña/valle

De igual manera que en caso de las brisas de costa/mar se generan las corrientes en las montañas y valles. Para empezar durante el día las laderas de las montañas se calientan más rápido que los valles, lo que provoca que el aire de las laderas debido a este incremento de temperatura varié su densidad y así ascienda como en el caso de la brisa marina se generara una depresión que atraerá al aire más frío presente en los

valles y así se generen estas brisas. Durante la noche la circulación del viento es inverso como es el caso de las brisas marinas. En la figura 1.4 se esquematiza lo antes mencionado acerca de las brisas de montaña/valle.

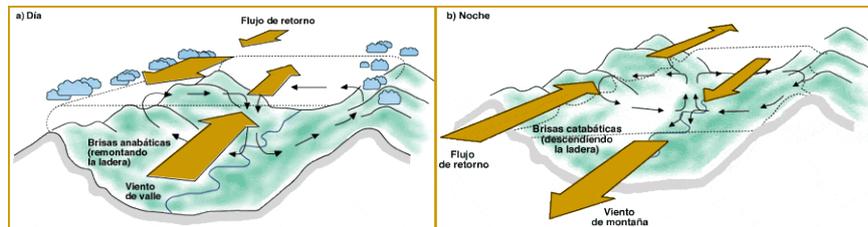


Figura 1.4. Brisas de montaña/valle. Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/atm/atm28.htm

1.4. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son equipos que aprovechan la energía cinética del viento y la convierten en energía mecánica para posteriormente transformarla en energía eléctrica. Estas máquinas han sufrido grandes cambios debido a las diferentes exigencias en lo que refiere a producción de energía, reducción de costos de fabricación e incremento de la eficiencia y rentabilidad del diseño.

1.4.1. Clasificación de los aerogeneradores

Los aerogeneradores pueden ser clasificados principalmente según la orientación (barlovento o sotavento) a la cual serán posicionados y según el sentido del eje del rotor (eje vertical u horizontal).

1.4.1.1. Según la orientación del viento

a) Barlovento

Los aerogeneradores a barlovento son aquellos en donde el flujo de viento cae directamente sobre su rotor o hélice. Estos tienen la ventaja de que poseen un mejor aprovechamiento del viento a diferencia de los de sotavento, sin embargo se necesita de un sistema de orientación que lo mantenga siempre en la dirección del viento. En la figura 1.5 se aprecia un aerogenerador tipo barlovento.

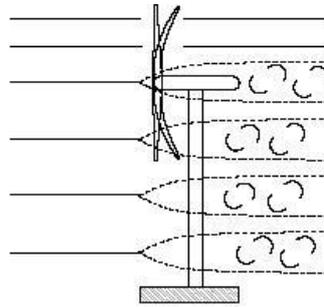


Figura 1.5. Aerogenerador a barlovento. Fuente: http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html#2. SEGUN POTENCIA SUMINIS TRADA

b) Sotavento

Los aerogeneradores a sotavento son aquellos en que el sentido del viento no se encuentra directamente enfocado sobre la hélice sino que previamente pasa sobre la cola, chasis y torre. Las ventajas de este tipo de aerogenerador es que no necesitan de un sistema de orientación aunque por seguridad se les suele construir y por otro lado la hélice a diseñar puede ser más flexible lo que reduce el peso y carga sobre la torre. La figura 1.6 muestra un aerogenerador tipo sotavento.

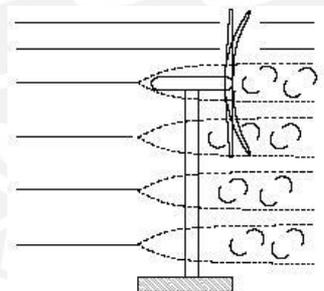


Figura 1.6. Aerogenerador a Sotavento. Fuente: http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html#2. SEGUN POTENCIA SUMINIS TRADA.

1.4.1.2. Según el sentido del eje del rotor

a) Aerogeneradores de eje vertical

Estos se caracterizan por tener su eje de rotación en posición vertical. En la actualidad existen dos diseños de este tipo de aerogenerador los cuales se detallan a continuación:

- Aerogenerador tipo Savonius

Este aerogenerador es de diseño de rotor más simple ya que su composición se basa en dos semicilindros huecos de ejes paralelos unidos a su eje de giro y separados una distancia adecuada. Las ventajas de este tipo de aerogenerador es que puede trabajar a bajas velocidades de viento además de poseer un fácil y bajo costo de fabricación. En la figura 1.7 se aprecia el aerogenerador antes mencionado.



Figura 1.7. Rotor Savonius. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius

- Aerogenerador tipo Darrieus

Es el aerogenerador de eje vertical más comercial, consiste en finas palas que están unidas al eje de rotación en los extremos superior e inferior. Su diseño es simétrico y similar a las alas de un avión con una curvatura especial diseñada para obtener un máximo rendimiento. En la figura 1.8 se aprecia un aerogenerador de este tipo.



Figura 1.8. Aerogenerador Darrieus. Fuente: <http://www.lbaindustrial.com.mx/ques-un-aerogenerador/>

b) Aerogenerador de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal se caracterizan por ser los más utilizados para la generación de energía eléctrica, ya que debido a su avanzado diseño es el que

posee mayor rendimiento de conversión de energía de viento a diferencia de los demás. Se pueden clasificar según la velocidad de rotación en lentos y rápidos.

- Aerogeneradores de velocidad de rotación lenta

Estos aerogeneradores se caracterizan por ser de tipo arrastre y que aprovechan la componente de la fuerza del viento perpendicular a la superficie de las palas. Estos además poseen un perfil no aerodinámico de palas en gran cantidad alrededor de su eje de rotación; su uso más frecuente es para el bombeo de agua. En la figura 1.9 se puede apreciar un aerogenerador de este tipo.

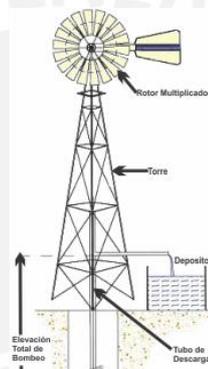


Figura 1.9. Aerogenerador para bombeo de Agua. Fuente:
<http://www.monografias.com/trabajos82/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua2.shtml>

- Aerogeneradores de velocidad de rotación rápida

Estos tipos de aerogenerador se caracterizan porque poseen una hélice constituida por una o más palas. Los perfiles usados en estas palas son similares al perfil de un ala de un avión debido a su forma aerodinámica lo que ayuda a el aprovechamiento de la velocidad del viento. Dentro de este tipo de turbinas tenemos la siguiente clasificación:

- Aerogenerador monopala

Este tipo de aerogenerador no es muy recomendado, ya que debido a su diseño se necesita un contrapeso al lado opuesto de la pala. Además, necesita de altas velocidad de viento para generar una buena energía de salida lo que ocasiona una disminución en de la vida de toda la máquina. En la figura 1.10 se puede apreciar un aerogenerador de este tipo.



Figura 1.10. Aerogenerador Monopala. Fuente:
<http://flyerone09.blogspot.com/2010/01/thinair-la-magia-del-monopala.html>

- Aerogenerador bipala

A diferencia de los aerogeneradores monopala los bipala tienen la ventaja de ahorro en peso, ya que no necesitan de un contrapeso. Por otro lado, debido a las fuertes sacudidas que sufre la turbina al pasar la pala por la torre su diseño es complejo y normalmente los ingenieros evitan construir aerogeneradores de un número par de palas debido a que genera inestabilidad en el aerogenerador. En la figura 1.11 se puede apreciar un aerogenerador de este tipo.



Figura 1.11. Aerogenerador Bipala. Fuente:
<http://naukas.com/2010/10/25/cuando-la-nasa-construía-aerogeneradores/modelo-bipala-mod-5b/>

- Aerogenerador tripala

A diferencia de los aerogeneradores antes mencionados este posee un régimen menor de giro lo que ayuda a que los esfuerzos sobre la estructura sean menores, además esta reducción del giro evita la excesiva generación de ruido y vibraciones. Esta es la configuración de aerogenerador más aplicada en lo que refiere a generación de energía eléctrica y será tema de estudio en la presente tesis. En la figura 1.12 se puede apreciar un aerogenerador tipo tripala.



Figura 1.12. Aerogenerador tripala. Fuente: <http://www.waira.com.pe/productos/>

1.4.2. Partes de un aerogenerador

Algunas de las principales partes un aerogenerador tripala, en cual está enfocado la presente tesis, son las mostradas en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Partes de un aerogenerador.

1	Palas	7	Góndola
2	Eje de baja velocidad	8	Anemómetro y veleta
3	Generador de Corriente	9	Buje
4	Multiplicador	10	Controlador Electrónico
5	Rotor	11	Unidad de Refrigeración
6	Eje de alta velocidad	12	Torre

En la figura 1.13 se muestra un aerogenerador con las partes antes detalladas en la tabla 1.1.

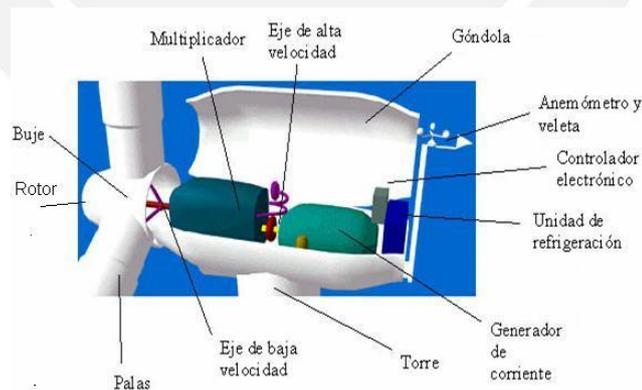


Figura 1.13. Partes de un aerogenerador. Fuente: http://opex-energy.com/eolica/principales_elementos_aerogeneradores.html

1.5. Fundamento teórico a aplicar

Para la interpretación correcta de la información relevante para el cálculo y simulación de los componentes mecánicos que conforman la estructura del aerogenerador se

necesita tener en claro los siguientes conceptos que serán herramientas claves para el desarrollo óptimo de la presente tesis.

1.5.1. Mecánica de los Fluidos

La mecánica de fluidos es la rama de la física que se encarga de estudiar el movimiento de los fluidos (gases y líquidos), así como las fuerzas que las ocasionan. Por lo que nos ayudara a entender el comportamiento del viento y su influencia sobre la hélice del aerogenerador. Para entender un poco más sobre el comportamiento del aire se explicará sobre los temas más relevantes que caracterizan a los fluidos y sobre el fenómeno aerodinámico en la hélice.

1.5.1.1. Dinámica de Fluidos

a) Fluido compresible y Flujo externo

La compresibilidad de un fluido se basa en la variación de la densidad. Los gases en general son muy compresibles a diferencia de los líquidos que poseen una baja compresibilidad. Al comparar la densidad del agua con la del aire a temperatura ambiente (ambos con una presión de 500 kPa) se aprecia que la densidad del agua varía apenas un 0.024%, por otro lado la densidad del aire varía en un 250%.

En cuanto al flujo externo está representado por la capa límite o capa fronteriza de un fluido, esta capa se forma a partir de la interacción entre un sólido el cual perturba el movimiento del fluido. La capa también se entiende como aquella en la que varía la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente perturbada. En la figura 1.14 se puede apreciar la distribución de la capa límite sobre un sólido.

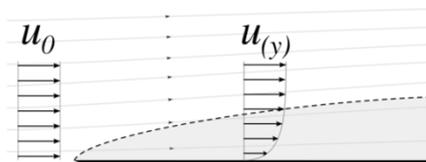


Figura 1.14. Fenómeno de la capa límite. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Capa_l%C3%ADmite#mediaviewer/File:Laminar_boundary_layer_scheme.svg

b) Límite de Betz

El límite de Betz o ley de Betz; es una herramienta que nos ayuda a entender que solo se puede convertir un $16/27$ (59%) de la energía cinética del viento en energía mecánica usando un aerogenerador. Esta fue formulada en 1919, y desde entonces es aplicada en cualquier aerogenerador con rotor en forma de disco. Esta nos explica que para una relación de $V_2/V_1 = 1/3$ se alcanza un valor máximo de potencia extraída del viento.



Figura 1.15. Ley de Betz. Fuente:
http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm

c) Flujo estacionario, laminar y turbulento

El flujo estacionario se caracteriza porque la velocidad del fluido en cualquier punto no varía con el tiempo. Además se tiene la particularidad de que en cualquier punto de un flujo permanente no existen cambios en la densidad, presión o temperatura con el tiempo.

En cuanto al flujo laminar este consiste en que el movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias bastante regulares, separadas y perfectamente definidas dando la impresión de que se tratara de láminas o capas más o menos paralelas entre sí, las cuales deslizan una sobre la otra sin que exista una mezcla entre ellas. La figura 1.16 muestra el flujo laminar sobre un perfil de un objeto.



Figura 1.16. Flujo Laminar. Fuente:
http://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_laminar#mediaviewer/File:Mov_laminar_1.JPG

Por otra parte las partículas del fluido en el flujo turbulento, al contrario que en el caso del flujo laminar, se mueven en trayectorias irregulares sin seguir un orden

establecido, ocasionando una transferencia de cantidad de movimiento de una porción de fluido a otra. En este tipo de flujo se desarrollan mayores esfuerzos cortantes en los fluidos, al igual que las pérdidas de energía mecánica. En la figura 1.17 se aprecia el flujo turbulento de un fluido.

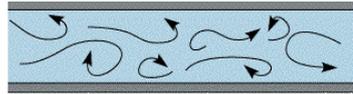


Figura 1.17. Flujo Turbulento. Fuente: <http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>

1.5.1.2. Aerodinámica

La aerodinámica es una herramienta necesaria para conseguir modelar las cargas que se generaran sobre las palas de la hélice del aerogenerador debido a la interacción con el viento, por ello se debe conocer las principales cargas que se presentan sobre los perfiles móviles de las palas. A continuación se describirá las principales fuerzas que se generan sobre las palas del aerogenerador:

a) Fuerza de arrastre y sustentación sobre la pala

El principio de giro de la hélice del aerogenerador es básicamente similar al que hace que los aviones vuelen; según este principio el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior de una pala o perfil inclinado, genera una diferencia de presiones entre ambas caras, dando origen a una fuerza resultante "R" que actúa sobre el perfil de la pala. Descomponiendo esta fuerza se obtienen:

- La fuerza de sustentación en dirección perpendicular al viento.
- La fuerza de arrastre en dirección paralela al viento.

En la figura 1.18 se puede apreciar las fuerzas mencionadas sobre la pala de un aerogenerador.

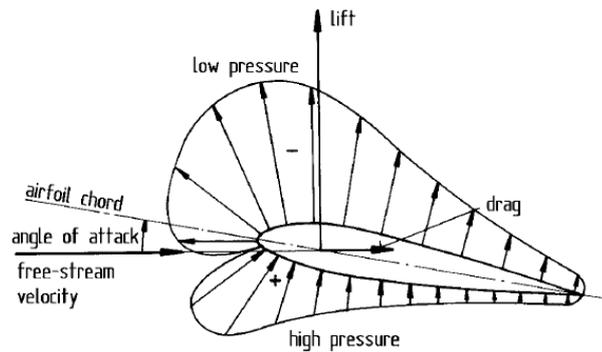


Figura 1.18. Fuerzas aerodinámicas actuantes: de sustentación (drag) y arrastre (lift) [16].

b) Fuerza de par y axial sobre la pala

La proyección de las fuerzas de arrastre (dR_x) y de sustentación (dR_y), ver figura 1.19, sobre el plano de rotación generan una fuerza útil, fuerza par que hace girar la hélice y otra fuerza perpendicular, fuerza axial que se compensa con la reacción del soporte del eje del rotor de la hélice.

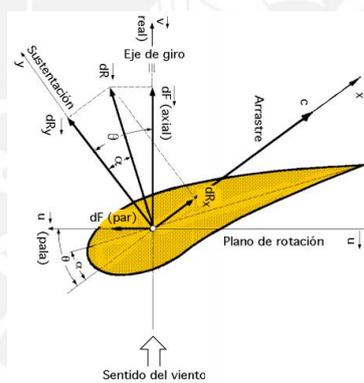


Figura 1.19. Fuerza de par y axial. Fuente: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/eolica/PDFs/02Eolo.pdf>

1.5.2. Mecánica de materiales

La mecánica de materiales es una rama de la mecánica que estudia las relaciones entre las cargas externas aplicadas a un cuerpo deformable y la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro del cuerpo. Esta disciplina de estudio implica también calcular las deformaciones del cuerpo y proveer un estudio de la estabilidad del mismo cuando está sometido a fuerzas externas.

1.5.2.1. Esfuerzo normal

El esfuerzo normal por carga axial, se genera por fuerzas que actúan de forma transversal a la sección que se desea analizar. Estos esfuerzos pueden ser de tracción o compresión, ver la figura 1.20. La ecuación que representa el esfuerzo debido a la carga axial es la siguiente:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} \left\{ \begin{array}{l} \sigma, \text{ esfuerzo normal en } \frac{N}{m^2}. \\ F, \text{ resultante de las fuerzas en direccion axial en N.} \\ A, \text{ área donde actua la resultatne de las fuerzas en } m^2. \end{array} \right. \quad (1.1)$$

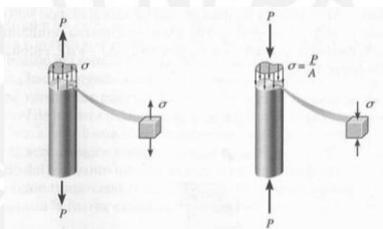


Figura 1.20. Esfuerzo axial a tracción y compresión [3].

El esfuerzo normal por momento flector es generado de la aplicación de un momento sobre un sólido de tal manera que aparecen esfuerzos normales de tracción o compresión sobre una misma sección, la cual se encuentra dividida por una línea conocida como línea neutra en la sección de análisis. En la figura 1.21 se puede apreciar este esfuerzo generado por el momento flector. La ecuación que representa este esfuerzo debido al momento flector es la siguiente:

$$\sigma_m = \frac{M \cdot y}{I} \left\{ \begin{array}{l} \sigma, \text{ esfuerzo normal en } \frac{N}{m^2}. \\ M, \text{ momento flector actuante sobre la sección a analizar en N. m.} \\ y, \text{ distancia desde eje neutro hacia el punto de interés en m.} \\ I, \text{ momento de inercia de la sección a analizaren } m^4. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

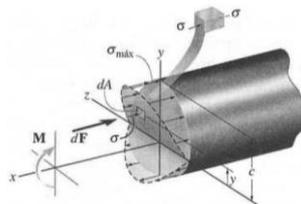


Figura 1.21. Esfuerzo normal por momento flector [3].

1.5.2.2. Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante, de corte o de cizalla se genera por una fuerza cortante que actúa en dirección paralela a la sección del sólido en análisis. La ecuación que representa el esfuerzo cortante debido a fuerza cortante es la siguiente:

$$\tau_c = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \left\{ \begin{array}{l} \tau, \text{esfuerzo cortante en } \frac{N}{m^2}. \\ V, \text{resultante de fuerzas cortantes en la sección transversal en N.} \\ Q, \text{porción de área superior o inferior } m^2. \\ I, \text{momento de inercia de la sección a analizar en } m^4. \\ t, \text{ancho de la sección a analizar en m.} \end{array} \right. \quad (1.3)$$

El esfuerzo cortante por momento torsor se genera por la aplicación de un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo. En la figura 1.22 se puede apreciar la deformación causada por este esfuerzo cortante debido al momento torsor. La ecuación que representa el esfuerzo debido al momento flector es la siguiente:

$$\tau_t = \frac{T}{J} \cdot c \left\{ \begin{array}{l} \tau, \text{esfuerzo cortante en } \frac{N}{m^2}. \\ T, \text{momento torsor total sobre una sección N. m.} \\ J, \text{momento polar de inercia en } m^4. \\ c, \text{radio exterior m.} \end{array} \right. \quad (1.4)$$



Figura 1.22. Deformación por esfuerzo de torsión [3].

1.5.3. Dinámica

La dinámica es una de las ramas de la mecánica que se encarga del estudio de la cinemática, la cual trata acerca de los aspectos geométricos del movimiento, y la cinética, la cual analiza las fuerzas que provocan el movimiento.

1.5.3.1. Vibraciones

La vibración se define como cualquier movimiento de un cuerpo o sistema de cuerpos conectados desplazados de una posición de equilibrio. En general, existen dos tipos de vibraciones, libre y forzada. La vibración libre, figura 1.23, ocurre cuando el movimiento se mantiene por fuerzas gravitacionales o elásticas, como el movimiento

oscilatorio de un péndulo o la vibración de una barra elástica. Por otro lado, la vibración forzada es provocada por una fuerza externa periódica o intermitente aplicada al sistema. Estos tipos de vibración pueden ser amortiguadas o no amortiguadas. Se clasifican como vibraciones no amortiguadas a aquellas en donde no se pierde o disipa energía por fricción u otra resistencia durante la oscilación; por el lado contrario se entiende que las vibraciones amortiguadas son aquellas que se pierde energía.

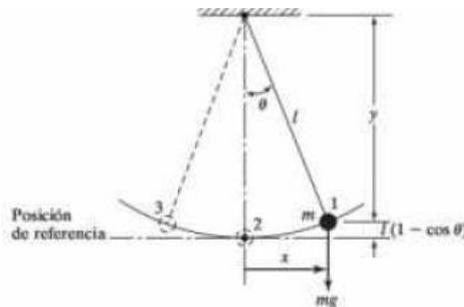


Figura 1.23. Vibración de péndulo simple [5].

1.5.3.2. Frecuencia natural

La frecuencia natural es aquella frecuencia que caracteriza un cuerpo o un sistema, en el cual estos alcanzan un grado máximo de oscilación. Cuando un cuerpo o sistema, los cuales poseen una o varias frecuencias características, es excitado hasta una de sus frecuencias características, su vibración es la máxima posible produciendo un aumento de la amplitud y provocando que el sistema entre en resonancia.

1.5.3.3. Resonancia

La resonancia es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración se acerca al periodo de vibración característico de dicho cuerpo, en el cual, una fuerza relativamente pequeña aplicada en forma repetida hace que una amplitud de un sistema oscilante se haga muy grande y provoque un efecto destructivo en algunos materiales.

1.6. Herramientas computacionales

Con respecto al estudio de los componentes de los aerogeneradores se puede encontrar en diferentes bibliografías que estos son ampliamente analizados con ayuda de herramientas computacionales, tanto análisis de fluidos como estructurales. Como se puede ver en las figuras 1.24, 1.25 y 1.26.

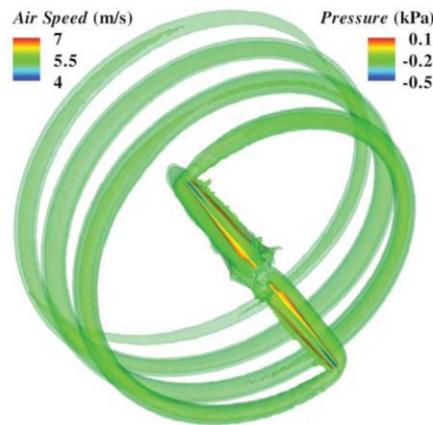


Figura 1.24. Vórtice generado por las palas con contorno de presión sobre la superficie del rotor [18].

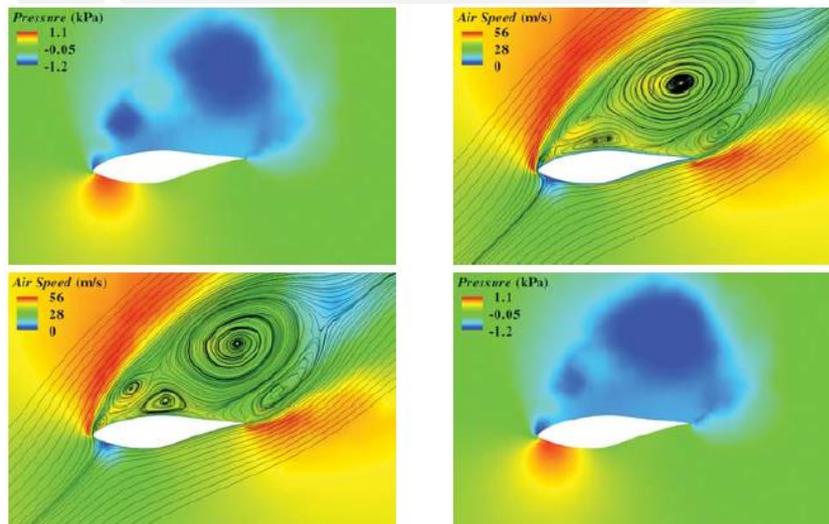


Figura 1.25. Presión, velocidad y líneas de corriente del aire [18].

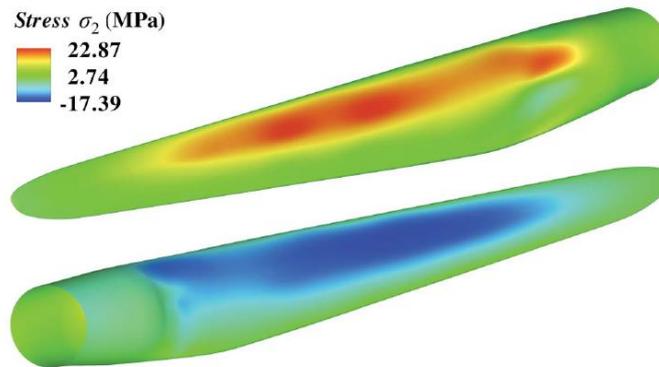


Figura 1.26. Distribución de esfuerzo normal sobre la dirección de la matriz del material [18].

1.6.1. Simulación numérica

Una simulación numérica es una recreación matemática de un proceso natural. En estas se estudian los procesos físicos, de ingeniería, económicos e incluso biológicos por lo que se puede decir que el campo de las simulaciones numéricas constituye un nutrido campo de investigación interdisciplinar. El uso de simulaciones numéricas para estudiar un problema requiere normalmente un cuidadoso estudio de los métodos numéricos y algoritmos a utilizar y de los procesos fundamentales a incluir en la simulación. En la figura 1.27 se puede observar los pasos a considerar que normalmente se deben de seguir para realizar una simulación numérica; en el caso de la presente tesis se aplicara el método de los elementos finitos y volúmenes finitos.

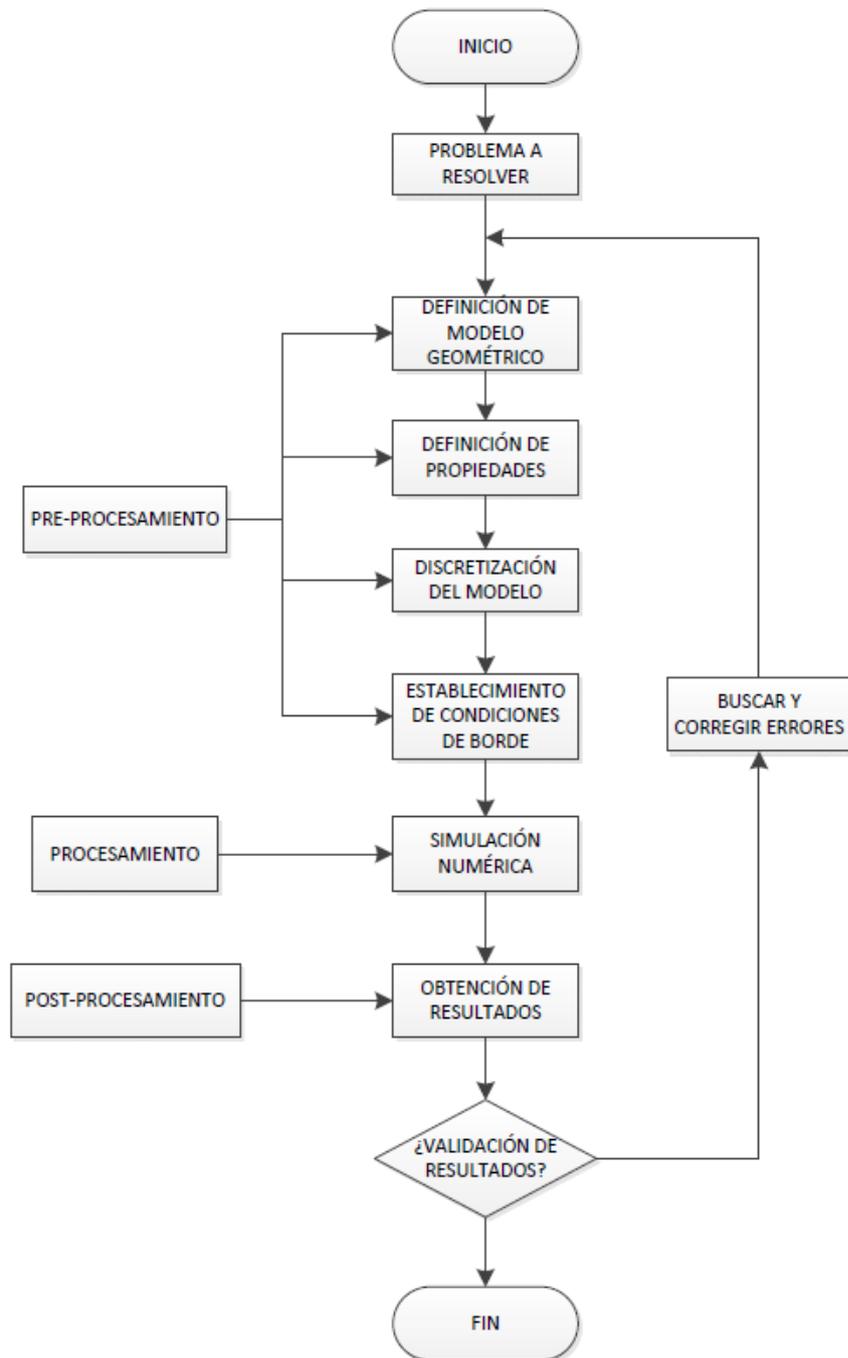


Figura 1.27. Procedimiento seguido en simulaciones numéricas.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO AERODINÁMICO, ESTRUCTURAL Y MODAL DE LA HÉLICE

2.1. Introducción

En el presente capítulo, se detallará el procedimiento realizado para el análisis aerodinámico, estructural y modal de la hélice. En primer lugar, se realizó el análisis aerodinámico mediante simulación numérica y mediante cálculos analíticos para proceder a exportar la información obtenida, campo de presiones sobre las palas de la hélice, y así poder proceder a realizar el análisis estructural y modal de estas mediante los procedimientos analíticos y mediante la simulación numérica respectiva. Finalmente, se procedió a realizar las comparaciones correspondientes de los resultados obtenidos mediante simulación numérica y métodos analíticos..

2.2. Análisis aerodinámico de la hélice mediante simulación numérica

Con el presente análisis aerodinámico, se buscó obtener el campo de presiones actuante sobre el volumen de fluido que rodea la hélice del aerogenerador en rotación así como las fuerzas y momentos en las diferentes direcciones. Para ello, se aplica la metodología de simulación aerodinámica con ayuda del método Mobile Reference Frame (MRF), el cual se basa, en el uso de dos subdominios (uno estático y otro rotacional). A continuación, se detalla el procedimiento aplicado para llevar a cabo este análisis mediante simulación numérica con ayuda del software ANSYS CFX.

2.2.1 Etapa de pre – procesamiento

En primer lugar, se procedió con la generación del modelo CAD de la hélice que se realizó en el software SOLIDWORKS 2015 con la información proporcionada por la empresa. En la figura 2.1, se muestra el modelo CAD de la hélice, la cual servirá para los diferentes análisis del presente capítulo, compuesta por 3 palas y el domo del rotor con las características mostradas en la tabla 2.1.



Figura 2.1. Modelo CAD de la hélice del aerogenerador.

Tabla 2.1. Características de la hélice del aerogenerador.

Características Geométricas	Simulación
Longitud de la pala	6 000 mm
Diámetro del rotor	12 m
Tipo de aerogenerador	Tripala a barlovento

El diseño del modelo CAD de la hélice (palas y domo), el cual se realizó en el software SOLIDWORKS, se detalla en el Anexo 2. Una vez obtenido el modelo final de la hélice, mostrado en la figura 2.1, se procedió a realizar la simulación aerodinámica. Para esta evaluación, según la metodología MRF; se procedió a dividir en dos dominios (estático y rotativo) el volumen del fluido que rodea a la hélice del aerogenerador para su respectivo análisis; el dominio más importante a analizar, es el dominio rotativo, ya que este representa el giro de la hélice, cabe resaltar que lo importante del estudio, es analizar el volumen del fluido externo que rodea la hélice por lo que en este análisis, se omite el estudio del modelo sólido.

Como se mencionó, para este análisis se utilizaran dos dominios (estacionario y rotativo) en base a la metodología de simulación MRF. Para poder definir, las dimensiones de cada dominio; se tomó en consideración las sugerencias proporcionadas por el software ANSYS CFX HELP obteniéndose los dominios

mostrados en las figura 2.2. Por otro lado, se optó para el análisis solo emplear el uso de la tercera parte de cada dominio como se muestra en las figura 2.2.

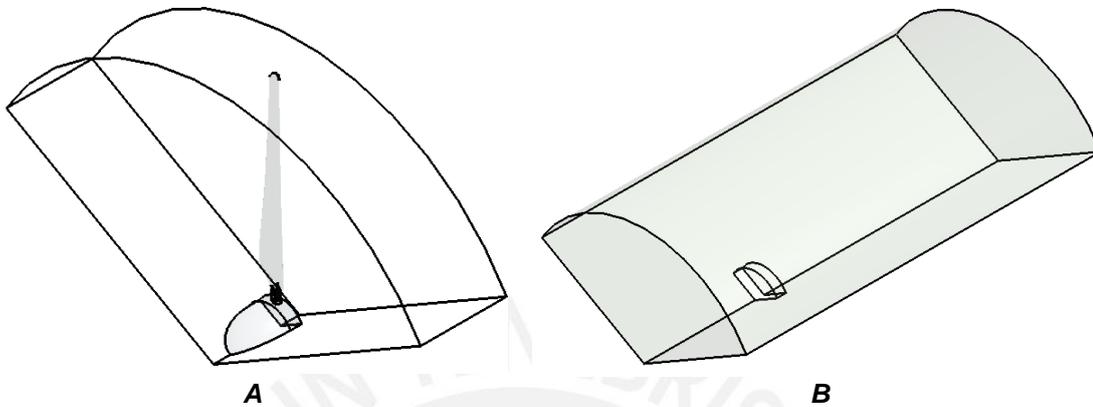


Figura 2.2. Dominio del sistema. A) Rotativo. B) Estacionario.

Una vez graficados, los dominios estacionario y rotativo, se procede a realizar el mallado en el software ANSYS CFX, obteniéndose las siguientes características del mallado de cada dominio:

- a) Características en el mallado del dominio rotativo:
 - Elementos usados Tetraédricos.
 - Tamaño de elementos de las palas: 5 mm.
 - *Inflation* de 0.1 mm de separación entre capas (20 en total).
- b) Características de mallado del sistema completo:

Tabla 2.2. Características del mallado.

Método de mallado	Patch conforming.
N° de Nodos	1 538 601
N° de elementos	5 620 391
Element Quality	63 %
Ortogonal Quality	83%
Skewness:	26 %
Aspect Ratio	17%

En la figura 2.3 se presenta el mallado de cada dominio. Además, en la figura 2.4 se puede ver el detalle del comando *inflation* utilizado, con el cual logra modelarse el efecto de la capa límite sobre las palas del aerogenerador; además la interfaz entre nodos de los dominios en la figura 2.5. Por otra parte en la tabla 2.2 se

detalla las características de mallado de los dominios estacionario y rotativo, los cuales en base a recomendaciones de ANSYS [17] son adecuados.

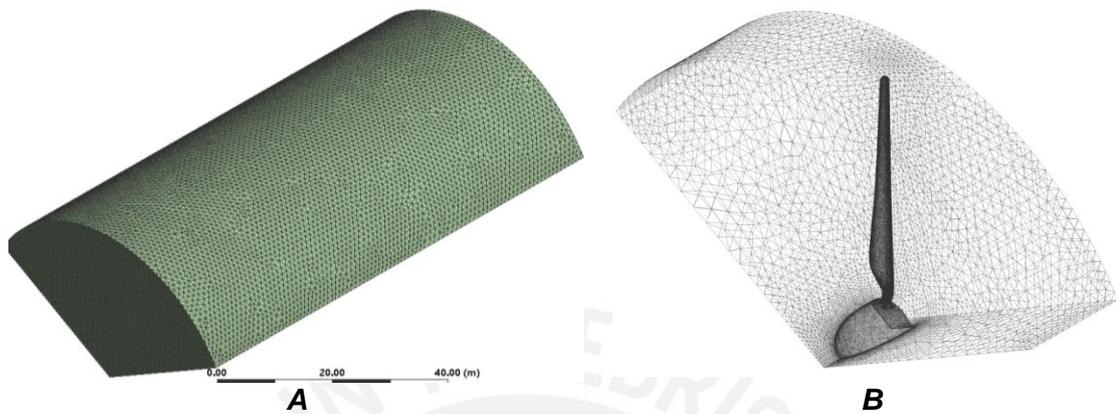


Figura 2.3. Mallado de dominios. A) Dominio estacionario. B) dominio rotativo

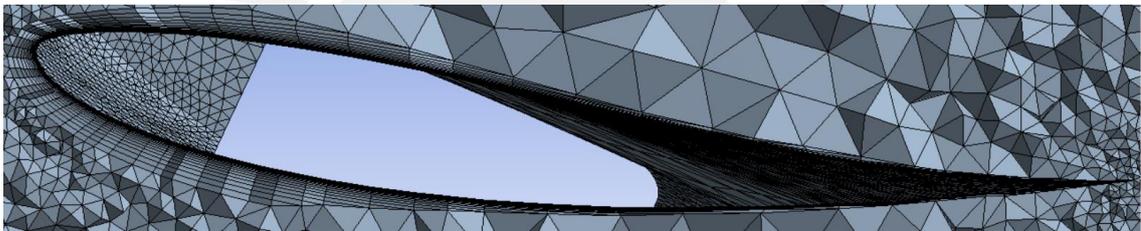


Figura 2.4. Efecto del comando inflation sobre el dominio rotativo.



Figura 2.5. Interfaz de contactos entre dominios rotativo (azul) y estacionario (verde).

Una vez mallado los dominios, se procedió a indicar las condiciones de borde en cada uno de estos, ver figura 2.6. A continuación se detalla las condiciones que se hacen en cada dominio:

- Dominio estacionario:

Se definen con las flecha color negro la zona de ingreso del aire (inlet), las zonas abiertas (openings) con flechas color azul en donde el aire es libre de ingresar o salir, la periodicidad con curvas color morado sobre las caras inferiores del dominio para así se pueda realizar la repetición en la simulación y finalmente de color verde las interfaces fluido - fluido entre las caras de cada dominio.

- Dominio rotativo:

De igual manera que en el dominio estacionario; se define la periodicidad con curvas color morado sobre las caras inferiores del dominio para así se pueda realizar la repetición en la simulación y finalmente de color verde las interfaces fluido - fluido entre las caras de cada dominio. Además de esto, se le da una condición de pared no rugosa a las paredes que representan la geometría de la pala de la hélice.

Se debe resaltar, que para ambos dominios y en base a recomendaciones del programa ANSYS *HELP* se consideró usar el método de conexión de mallado GGI (*General Grid Interface*) para evitar desfases entre nodos mejorando la precisión en el análisis. Por otro lado se define un análisis del tipo estacionario con el modelo de turbulencia SST (*Shear-Stress Transport*) sugerido por el software para este tipo de análisis.

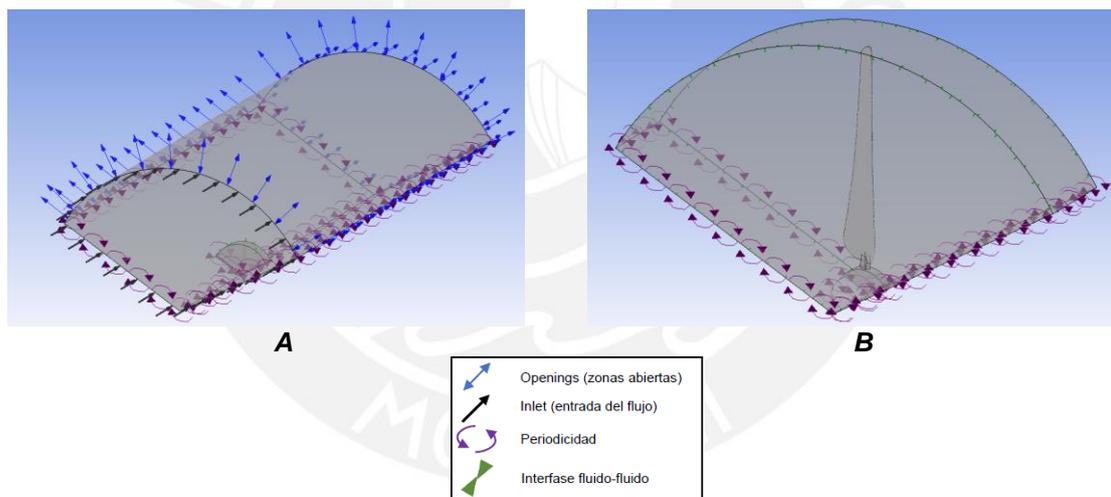


Figura 2.6. Condiciones de borde en los dominios A) Estacionario. B) Rotativo.

2.2.2 Etapa de procesamiento

En esta etapa, el software se encarga de resolver las ecuaciones del sistema de manera iterativa, estas iteraciones finalizan al converger los parámetros de control del solucionador o se llega al número definido de iteraciones. En el transcurso del procesamiento, se puede monitorear las ecuaciones de movimiento y conservación de la masa, además de las de torque y fuerzas como se puede apreciar en las figura 2.7.

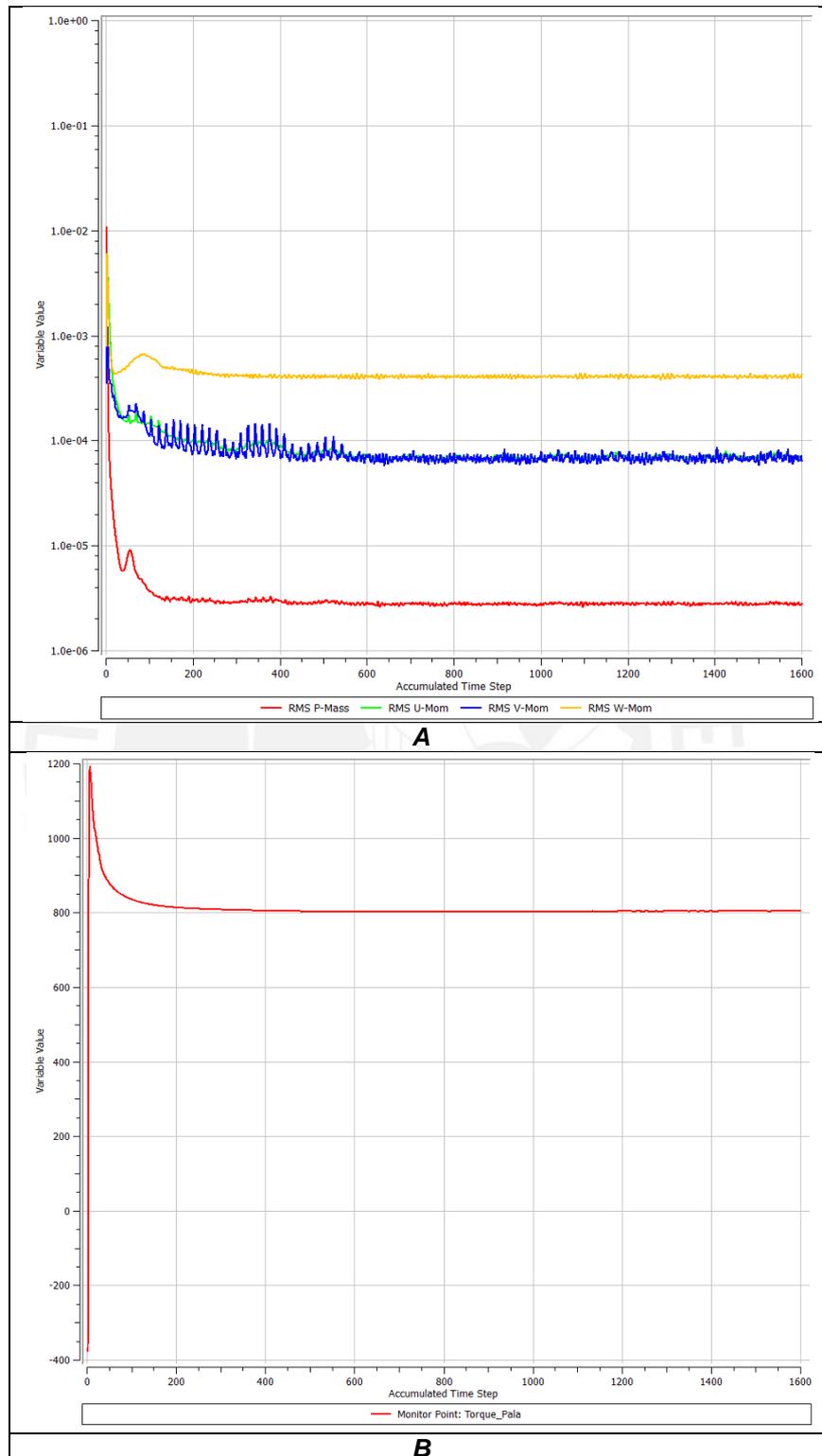


Figura 2.7. Monitores de ANSYS SOLVER, A) Monitor de ecuaciones de movimiento y masa. B) Monitor de torque.

2.2.3 Etapa de post – procesamiento

En esta etapa, se obtienen las gráficas representativas del campo de presiones sobre la hélice, el campo de presiones total, el campo vectorial de velocidades y líneas de flujo, además de esto se obtiene los valores de torque para realizar el cálculo de potencia para la comparación con el análisis analítico así como la fuerzas que se generan sobre la pala en las diferentes direcciones. Por otro lado, cabe resaltar que las gráficas que a continuación se presentaran son para el caso de velocidad de ingreso de aire de 10 m/s y velocidad de giro de 120 rpm (caso nominal); además los casos analizados son los mostrados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Condiciones para los diferentes casos analizados.

Caso	Velocidad del viento (m/s)	Velocidad de giro (rpm)
1	8	100
2	8	120
3	8	150
4	10	100
5 (Caso Nominal)	10	120
6	10	150
7	12	100
8	12	120
9	12	150

En la figura 2.8, se puede apreciar el campo de presiones actuante sobre la hélice y por otro lado en la figura 2.9, se muestra como varia la presión antes de pasar por las palas de la hélice de tal manera que se da un pequeño incremento antes de pasar por estas y un decrecimiento al salir de estas.

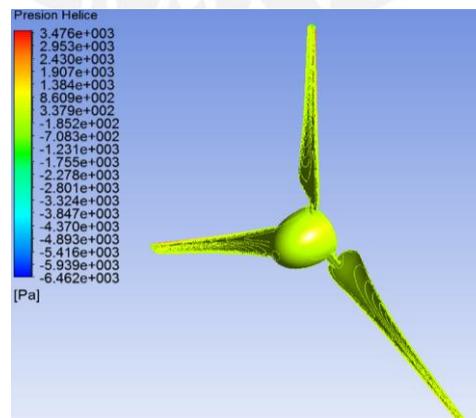


Figura 2.8. Campo de presiones (Pa) sobre la hélice.

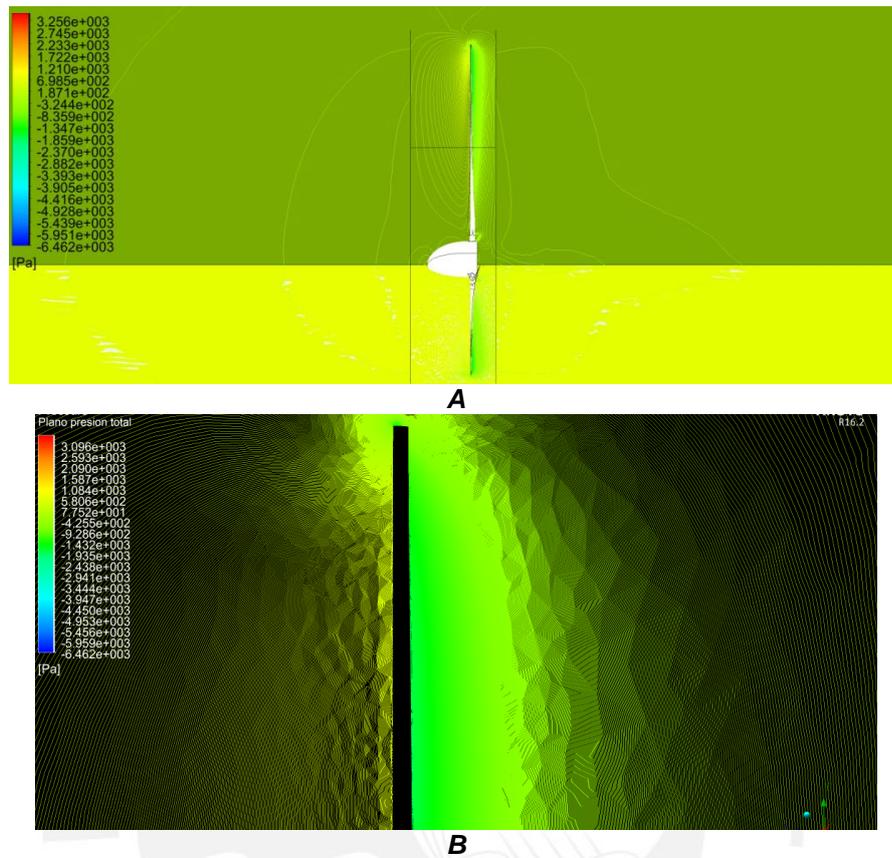


Figura 2.9. Campo de presiones (Pa) en los dominios del sistema. A) Plano transversal al dominio estacionario. B) Detalle de variación de presión en pala.

Por otra parte, en la figura 2.10 se reflejan los vectores de velocidad en donde se logra captar turbulencias en las cercanías de las palas, este fenómeno es usual en los aerogeneradores de este tipo y es debido a este que la potencia se reduce ya que se incrementa la fuerza de arrastre sobre los perfiles.

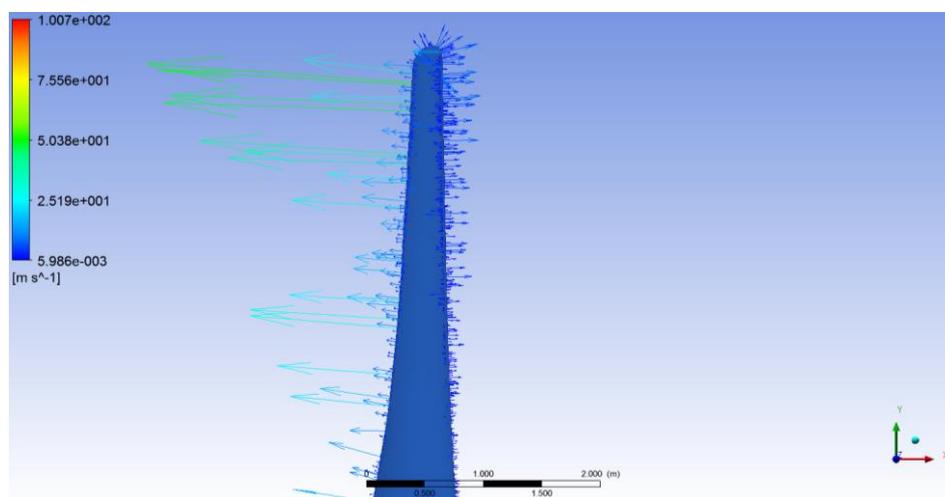
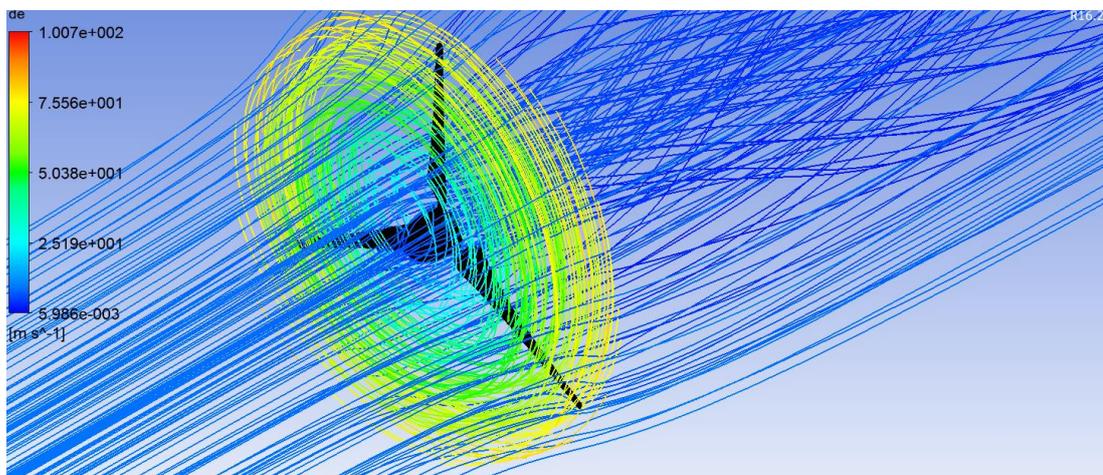
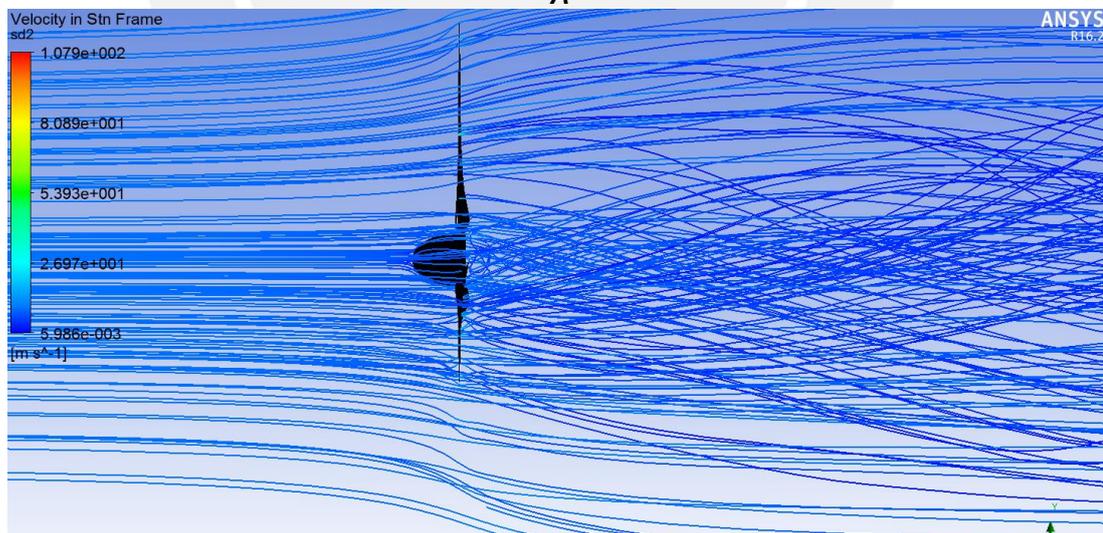


Figura 2.10. Campo vectorial de velocidades sobre la pala.

En la Figura 2.11, se puede apreciar como varia el flujo de aire en el ingreso y la salida luego del contacto con las palas de la hélice, esto de acuerdo al cambio de flujo teórico es de esperarse ya que el flujo al ingresar se abre paso sobre la hélice e incrementa su sección a la salida, este es un factor que nos indica que la simulación tiene concordancia con el comportamiento teórico. Por otro lado, cabe resaltar que en el trayecto parte del flujo se llega a asemejar en magnitud a la velocidad de rotación de la hélice debido a existen varios puntos se encuentran cercanos a las palas.

**A****B**

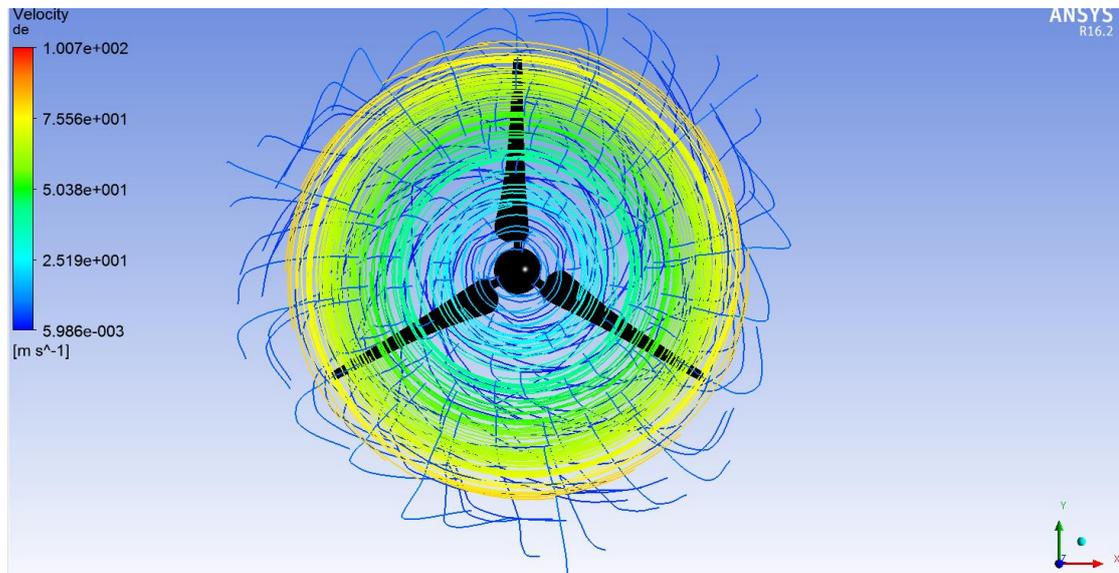


Figura 2.11. Líneas de flujo de aire entrando y saliendo de la hélice. A) Vista isométrica. B) Vista lateral. C) Vista frontal.

Finalmente, se presenta en la tabla A2.1 del Anexo 3, para cada caso los valores de torques y fuerzas extraídos de las simulaciones y además el cálculo de potencias para cada uno de estos.

2.3. Análisis aerodinámico de la hélice mediante método analítico

Como parte del capítulo 2, y para poder realizar las correspondientes verificaciones de la simulación numérica del fenómeno aerodinámico del aerogenerador, se realizó un análisis analítico de éste; para ello, se optó usar una de las metodologías más aplicadas para este tipo de análisis, la metodología BEM (Blade Element Momentum).

2.3.1 Análisis aerodinámico mediante la metodología BEM

El presente análisis, se realizará para el caso nominal en donde la velocidad del viento es igual a 10 m/s y la rotación 120 rpm. Para esto; a continuación, se detallará el ejemplo de cálculo así como los pasos a seguir, para realizar el análisis mediante esta metodología de la estación número 3 de la pala. Para el respectivo análisis, se debe de seguir los siguientes pasos:

- 1) Asumir los valores de los factores de inducción axial (a) y el factor de inducción rotacional (a') dándoles un valor igual a 0.

2) Realizar el cálculo del ángulo de velocidad relativa (ϕ) con la ecuación (2.1).

$$\tan(\phi) = \frac{(1-a)}{(1+a')} \cdot \frac{V_o}{w \cdot r} \left\{ \begin{array}{l} w: \text{velocidad angular de giro del rotor, } \frac{\text{rad}}{\text{s}}. \\ V_o: \text{velocidad del viento, } \frac{\text{m}}{\text{s}}. \\ r: \text{distancia del perfil con respecto del rotor, m.} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Con la información de la estación 3 (ver anexo 2) y aplicando la ecuación se obtiene un valor de $\phi = 33.55^\circ$.

3) Realizar el cálculo del ángulo de ataque (α) con la ecuación (2.2).

$$\alpha = \phi - \beta \left\{ \begin{array}{l} \phi: \text{ángulo de velocidad relativa, } ^\circ. \\ \beta: \text{ángulo de giro, } 18.8^\circ. \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Con el uso de la ecuación se obtiene el valor de $\alpha = 14.75^\circ$

4) Realizar el cálculo del factor de corrección de Prandtl (F') con las ecuaciones (2.3) y (2.4).

$$F' = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1}(e^{-f}), \quad (2.3)$$

$$f = \frac{B}{2} \cdot \frac{R-r}{r \cdot \sin(\phi)} \quad \{ B: \text{número de palas.} \} \quad (2.4)$$

Aplicando las ecuaciones se obtiene que $f = 9.6358$ y $F' = 0.6366$.

5) Realizar el cálculo del valor de solidez (σ) mediante la ecuación (2.5).

$$\sigma = \frac{c(r) \cdot B}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad \{ c(r): \text{Cuerda local, m.} \} \quad (2.5)$$

Aplicando la ecuación se obtiene $\sigma = 0.3979$.

6) Obtener los valores del coeficiente de sustentación (C_L) y el coeficiente de arrastre (C_d), con la ayuda del programa QBLADE. Además de esto se debe de realizar el cálculo del número de Reynolds con la ecuación (2.6) ya que este dato es de importancia en el programa indicado para así poder obtener los valores de los coeficientes.

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \left\{ \begin{array}{l} v: \text{Velocidad del fluido, } \frac{m}{s}. \\ l: \text{Longitud de la cuerda, } m. \\ \nu: \text{Viscosidad cinemática del fluido a } 10^{\circ}C, \frac{m^2}{s}. \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Una vez con el dato del número de Reynolds; se procedió con ayuda del programa QBLADE a obtener los coeficientes de sustentación y de arrastre. En la Figura 2.12, se puede apreciar las gráficas obtenidas de los coeficientes con el programa.



Figura 2.12. Gráficas de los coeficientes de arrastre y sustentación vs ángulo de ataque. A) Coeficiente de sustentación. B) Coeficiente de arrastre.

De las gráficas se obtiene lo siguiente:

- $C_L = 1.76$,
 - $C_d = 0.088$.
- 7) Realizar el cálculo del coeficiente normal y tangencial con las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$C_n = C_l \cdot \cos(\phi) + C_d \cdot \sin(\phi), \quad (2.7)$$

$$C_t = C_l \cdot \sin(\phi) - C_d \cdot \cos(\phi). \quad (2.8)$$

Aplicando las ecuaciones se obtiene que $C_n = 1.5154$ y $C_t = 0.8994$.

- 8) Realizar el cálculo del factor de inducción axial y el factor rotacional con las ecuaciones (2.9) y (2.10).

$$a = \frac{1}{\frac{4 \cdot F \cdot \sin^2(\phi)}{\sigma \cdot C_n} + 1}, \quad (2.9)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cdot F \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\phi)}{\sigma \cdot C_t} - 1}. \quad (2.10)$$

Aplicando las ecuaciones y parámetros hallados en los pasos anteriores se obtiene que $a = 0.4367$ y $a' = 0.4390$.

Se debe tomar en cuenta que si $a > 0.2$, se debe aplicar el factor de corrección recomendado de Glauert, éste se calcula aplicando las ecuaciones (2.11) y (2.12).

$$a = \frac{1}{2} \cdot \left[2 + K \cdot (1 - 2 \cdot 0.2) - \sqrt{(K \cdot (1 - 2 \cdot 0.2) + 2)^2 + 4 \cdot (K \cdot 0.2^2 - 1)} \right], \quad (2.11)$$

$$K = 4 \cdot F \cdot \frac{\sin^2(\phi)}{\sigma \cdot C_n}. \quad (2.12)$$

Una vez resueltas las ecuaciones se obtiene el nuevo valor de $a = 0.3994$.

- 9) Comparar los valores de los factores de inducción axial y rotacional asumidos con los obtenidos, si estos no tienen una similitud aceptable se procede a realizar nuevamente los pasos anteriormente detallados pero ahora los valores obtenidos pasaran a ser los asumidos. Una vez que se obtenga una similitud aceptable, entre los valores asumidos y los obtenidos se procede a calcular la fuerza normal y la fuerza tangencial con las ecuaciones (2.13) y (2.14).

$$F_N = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{V_o^2 \cdot (1 - a)^2}{\sin^2(\phi)} \cdot c \cdot C_N, \quad (2.13)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{V_o \cdot (1 - a) \cdot w \cdot r \cdot (1 + a')}{\sin(\phi) \cdot \cos(\phi)} \cdot c \cdot C_T. \quad (2.14)$$

Aplicando las ecuaciones y parámetros hallados en los pasos anteriores se obtiene que $F_N = 191.5305$ N y $F_T = -0.5901$ N. Finalmente, se realizó el mismo procedimiento para las todas las estaciones que conforman la pala del aerogenerador. En el Anexo 4, se pueden ver las tablas A4.1 y A4.2 se detallan los valores obtenidos, teniendo más relevancia los valores de las fuerzas normal, tangencial y el torque longitudinal por

estación. Luego de calcular las fuerzas normales, tangenciales y torque en función de la longitud se realiza el trazado de las gráficas mostradas en la figura A4.1, en el Anexo 4, cabe resaltar que con estas tres graficas mostradas en la figura antes mencionada se pueden hallar los valores de fuerza normal, tangencia y momento por pala.

2.4. Análisis estructural de la hélice mediante simulación numérica

A continuación, se llevará a cabo el análisis estructural de la hélice con el uso de la información obtenida (campo de presiones) de la simulación del fenómeno aerodinámico de la hélice con ayuda de la interfaz fluido – estructura (FSI) de ANSYS MECHANICAL.

2.4.1 Etapa de pre – procesamiento

Para el análisis se usó el modelo CAD de la hélice, que se realizó en el software SOLIDWORKS 2015, se toma en cuenta para el análisis, que las palas poseen un espesor de 3 mm y que el domo es de espesor 8 mm. En la figura 2.13, se muestra el modelo CAD de la hélice a usar.

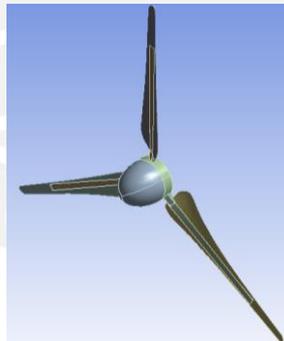


Figura 2.13. Modelo CAD de la hélice del aerogenerador.

Una vez definido el modelo a usar se procede a realizar el mallado de la hélice en el módulo ANSYS MECHANICAL, el cual cuenta con las siguientes características:

Características de mallado de la pala:

- Método de mallado: Patch conforming.
- Elementos usados Tetraédricos.

- Numero de nodos y elementos: 1 369 353 y 2 744 868 respectivamente.
- Tamaño de elementos de las palas entre los valores de 2.5 a 5 mm.
- Element Quality, Skewness y Othogonal Quality con valores mostrados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores de los parámetros de la calidad de malla.

Parámetro	Valor
Element Quality	0.9479
Skewness	0.7828
Orthogonal quality	0.9514

Cabe resaltar que para poder mallar la pala se debe de usar el comando Inflation con el cual se modela en el caso del fluido el efecto de la capa limite sobre estas. En la figura 2.14, se muestra el mallado de la hélice y algunos acercamientos en las diferentes zonas.

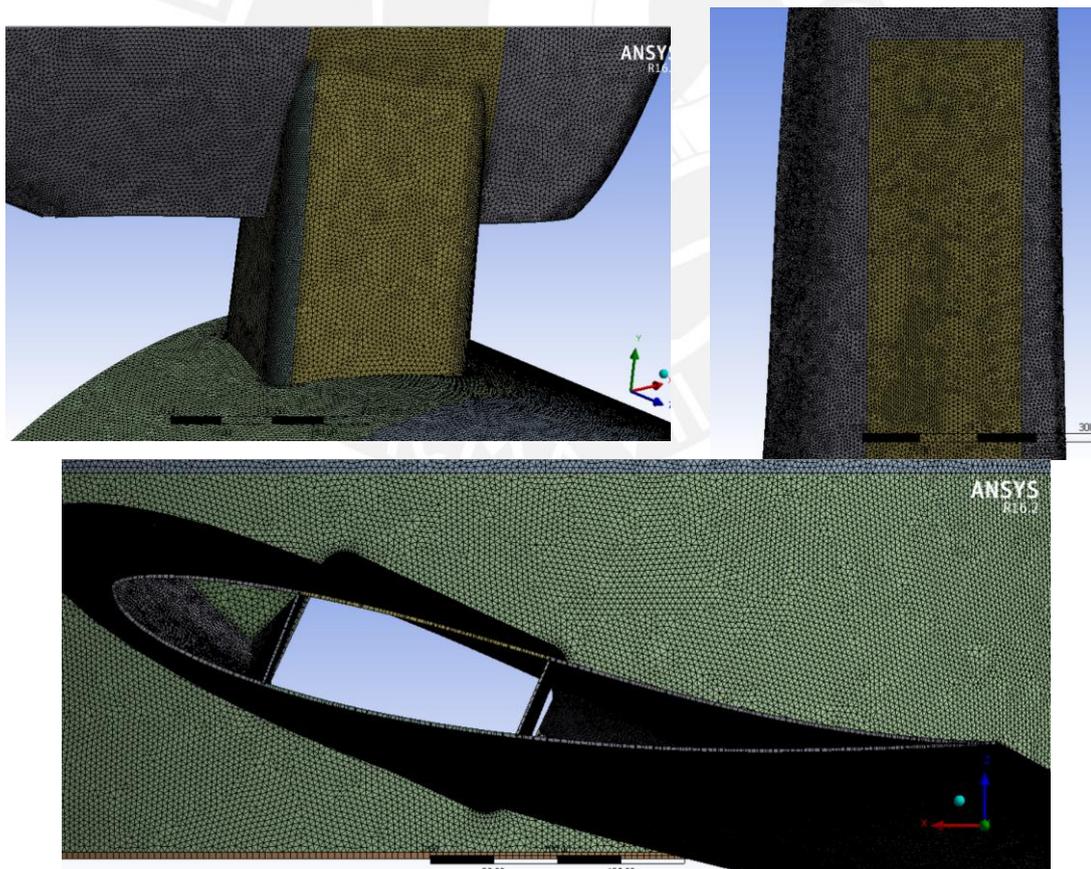


Figura 2.14. Detalles del mallado de la hélice.

Una vez mallada la hélice se procedió a indicar las condiciones de borde mostradas en la figura 2.15, las cuales son las siguientes:

- a) Apoyo fijo en el domo, movimiento y giro restringido en los ejes.
- b) Gravedad de la Tierra ,9.81 m/s².
- c) Se considera movimiento rotacional en el eje del domo igual a 150 rpm.
- d) Se usa el campo de presiones obtenido en la simulación numérica y se muestra en la figura 2.16.
- e) Se consideran las propiedades del material de la hélice como las que se muestran en la tabla 2.5 [15].

Tabla 2.5. Propiedades ortotrópicas de la fibra de vidrio.

Propiedad	Magnitud	Unidad
Densidad	1 550	Kg/m ³
Módulo de Young en X	13 300	MPa
Módulo de Young en Y	7 583	MPa
Módulo de Young en Z	7 583	MPa
Módulo de Poisson en XY	0.32	-
Módulo de Poisson en YZ	0.37	-
Módulo de Poisson en XZ	0.35	-
Módulo de corte en XY	5 446	MPa
Módulo de corte en YZ	2 964	MPa
Módulo de corte en XZ	2 964	MPa
Esfuerzo a la Fluencia	270	MPa
Esfuerzo de Rotura	369	MPa



Figura 2.15. Condiciones de borde de la hélice.

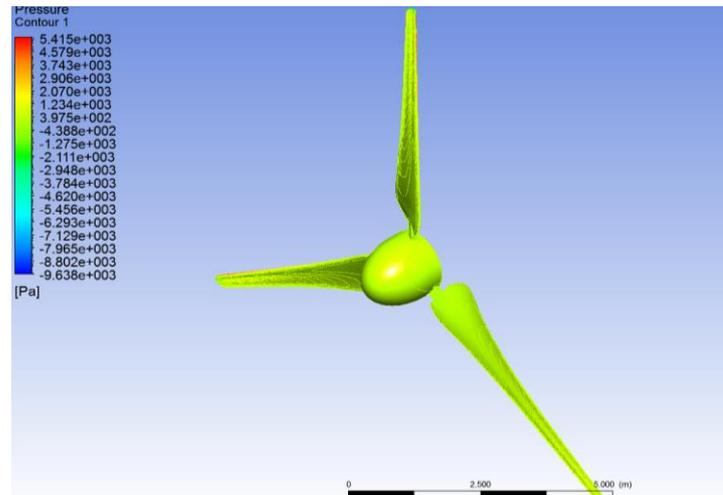


Figura 2.16. Campo de presiones sobre la hélice.

2.4.2 Etapa de procesamiento

En esta etapa el software computacional, se encarga de analizar y calcular los resultados necesitados en base a la solicitud.

2.4.3 Etapa de post – procesamiento

En esta etapa, se obtuvo las gráficas y valores de las reacciones, los desplazamientos y esfuerzos que presenta la hélice. En la figura 2.17, se puede apreciar los desplazamientos que sufre la hélice en toda su geometría y la máxima ubicada en la conexión entre el domo y la pala siendo igual a 64.343 mm.

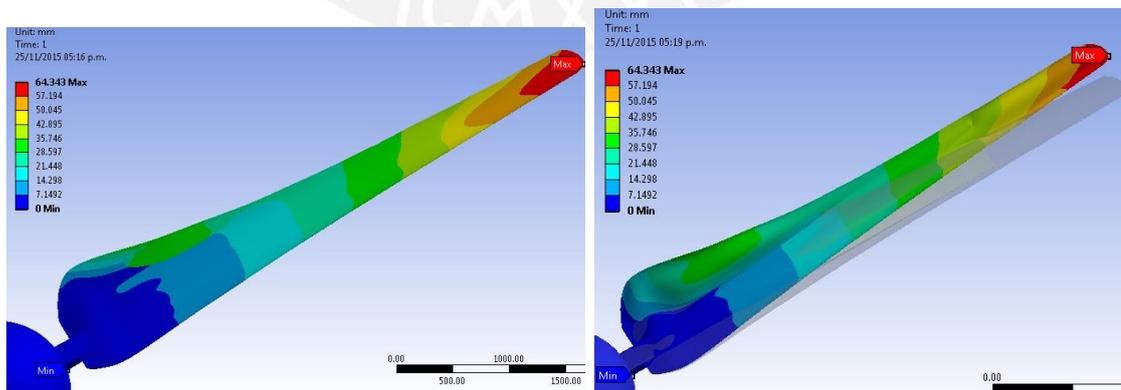


Figura 2.17. Desplazamiento (mm) de la pala de la hélice.

En la figura 2.18, se puede apreciar la distribución de esfuerzos sobre una de las palas de la hélice, además se aprecia que el esfuerzo máximo es igual 207.02 MPa y se da entre la conexión de la pala con el domo como se esperaba.

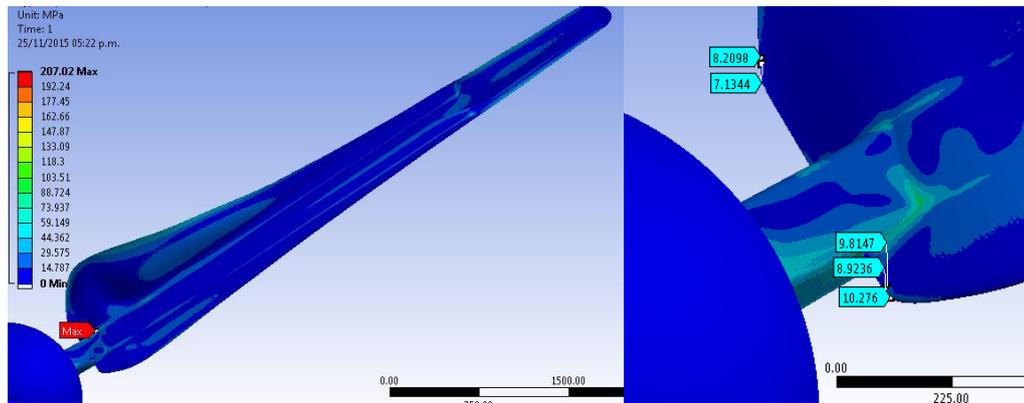


Figura 2.18. Esfuerzos (MPa) sobre la pala de la hélice.

En la figura 2.19, se muestra la distribución de los factores de seguridad sobre la hélice.

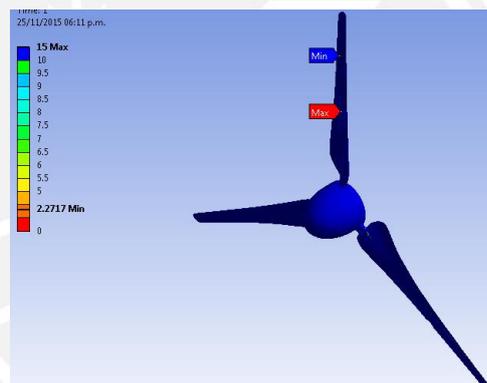


Figura 2.19. Factor de seguridad de la hélice.

2.5. Estudio estructural estático de la hélice mediante método analítico

El presente análisis, se llevará a cabo para poder validar la simulación estructural realizada de la hélice antes mencionada comparando los valores finales obtenidos. Las consideraciones para este análisis son las siguientes:

- Se asume que el comportamiento del material es linealmente elástico.
- Se asumen las palas de la hélice como vigas empotradas en el rotor de la hélice.
- Se considera que las fuerzas y momentos resultantes sobre cada pala es igual.

Una vez definidas estas consideraciones, se detalló en el Anexo 5 el procedimiento seguido para realizar el estudio analítico de una pala de la hélice del aerogenerador, en esta etapa se tomara en cuenta el análisis del caso crítico de velocidad igual a 12 m/s y 150 rpm.

2.6. Análisis modal de la hélice mediante simulación numérica

A continuación, se detallara el procedimiento realizado para realizar el análisis modal de la hélice del aerogenerador mediante simulación numérica. Con este análisis, se busca obtener las frecuencias naturales del sistema para luego poder calcular las velocidades críticas del sistema.

Para la simulación, se usará el programa ANSYS MECHANICAL y además se usará la información del campo de presiones obtenida en la simulación del análisis aerodinámico. El análisis; se centrará básicamente en dos tipos (independiente y pre-stress), en el independiente la simulación modal toma en cuenta las cargas que afectan al sistema y por otro lado en el pre – stress es un tipo de simulación modal en la que no se toma las cargas en cuenta sobre el sistema. Los casos a analizar son los siguientes:

- Con rotación y sin presiones
- Sin presiones y sin cargas (caso de vibración libre sin amortiguamiento)
- Con carga y con rotación

Cabe resaltar que, se analizaran estos 3 casos ya que de esta manera se podrá obtener y comparar los diferentes modos de vibración de la hélice además de entender la influencia de los diferentes tipos de cargas.

2.6.1. Etapa de pre – procesamiento

Para el análisis, se usó el mismo modelo CAD de la hélice que se usó en el análisis estructural. Una vez exportado este modelo se procedió a realizar el mallado de la hélice en el módulo ANSYS MECHANICAL. Con respecto, a las condiciones de borde para los casos a analizar se detallan a continuación:

Condiciones de borde Caso 1, rotación y sin presiones:

- Soporte fijo en el domo, velocidad rotacional 120 rpm y gravedad de 9.81 m/s^2 .

Condiciones de borde Caso 2, sin presiones y sin carga:

- Soporte fijo en el domo y gravedad de 9.81 m/s^2 .

Condiciones de borde Caso 3, con carga y con rotación:

- Soporte fijo en el domo, velocidad rotacional de 120 rpm, campo de presiones del análisis aerodinámico y gravedad de 9.81 m/s^2 .

2.6.2. Etapa de procesamiento

En esta etapa, el software computacional se encarga de analizar y calcular los resultados necesitados en base a la solicitud.

2.6.3. Etapa de post – procesamiento

En esta etapa, se analizaron los resultados obtenidos de la simulación determinando las frecuencias naturales y luego las velocidades críticas de la hélice en los diferentes casos analizados.

- Caso 1:

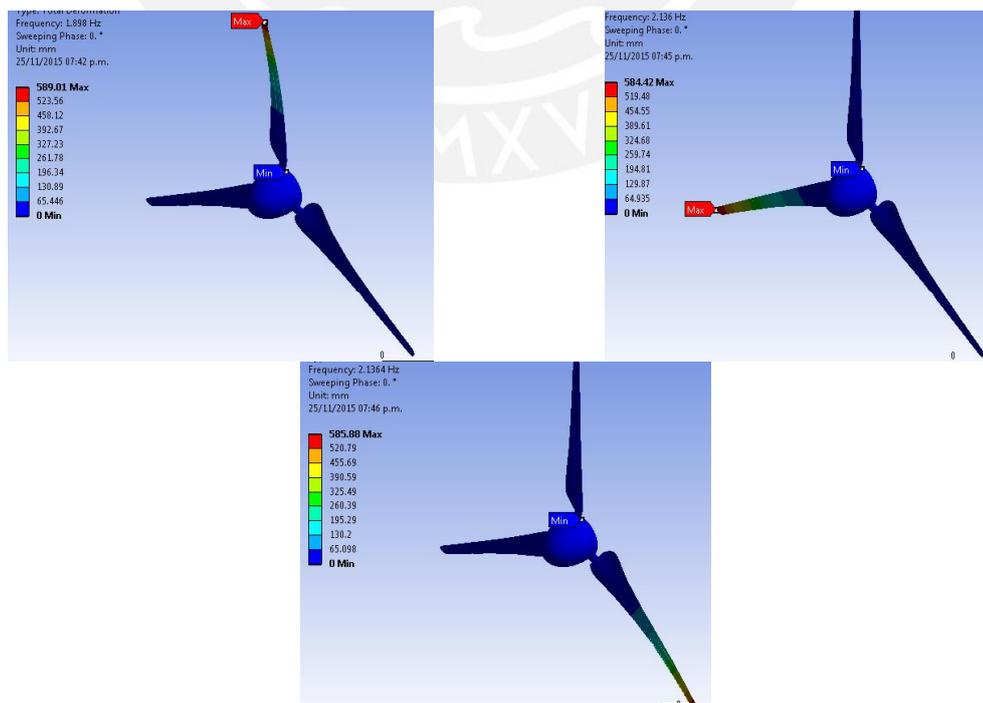


Figura 2.20. Modos de vibración de la hélice para el caso 1.

Tabla 2.6. Valores de los modos de vibración y frecuencias naturales en el caso 1.

Modo	Modo de vibración	Frecuencia Natural (Hz)	Velocidad (rpm)
1,2,3	Flexión	[2.065 ; 2.136 ; 2.1364]	[123.88 ; 128.16 ; 128.184]
4,5,6	Flexión – Torsión	[5.295 ; 5.6083 ; 5.6187]	[317.701 ; 336.499 ; 337.123]

Como se puede ver en la tabla 2.6, en este caso se puede notar que los tres primeros modos de vibración se acercan a la velocidad de funcionamiento igual a 120 rpm. Por lo que se consideraría, que la velocidad crítica para este caso es igual a 123.88 rpm, ya que ésta se acerca más a la de funcionamiento.

- Caso 2:

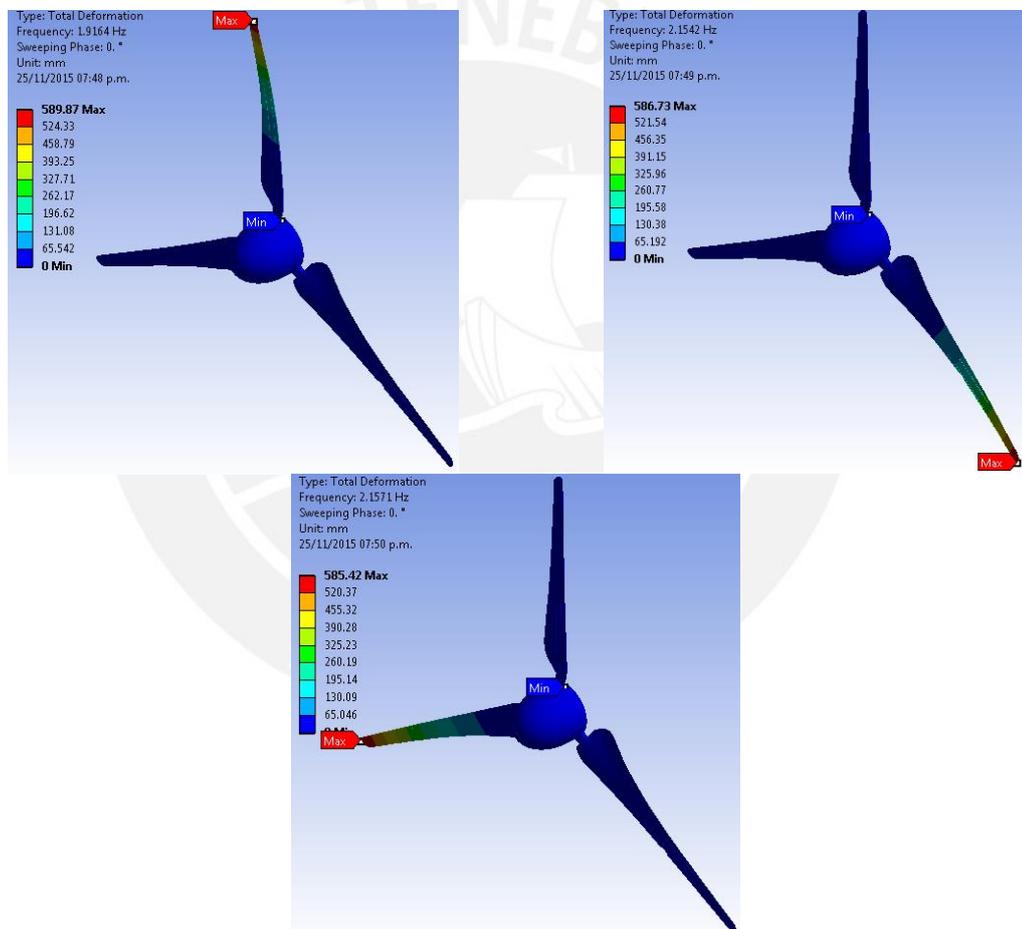


Figura 2.21. Modos de vibración de la hélice para el caso 2.

Tabla 2.7 Valores de los modos de vibrar y frecuencias naturales en el caso 2.

Modo	Modo de vibración	Frecuencia Natural (Hz)	Velocidad (rpm)
1,2,3	Flexión	[2.083; 2.1542 ; 2.1571]	[124.984 ; 129.252 ; 129.426]
4,5,6	Flexión – Torsión	[5.2442 ; 5.562 ; 5.5638]	[314.653 ; 333.721 ; 333.829]

Como se puede ver en la tabla 2.7, este caso es crítico ya que se puede apreciar que los tres primeros modos de vibración se acercan a la velocidad de funcionamiento

igual a 120 rpm. Por lo que se consideraría, que la velocidad crítica para este caso es igual a 124.984 rpm, ya que esta se acerca más a la de funcionamiento.

- Caso 3:

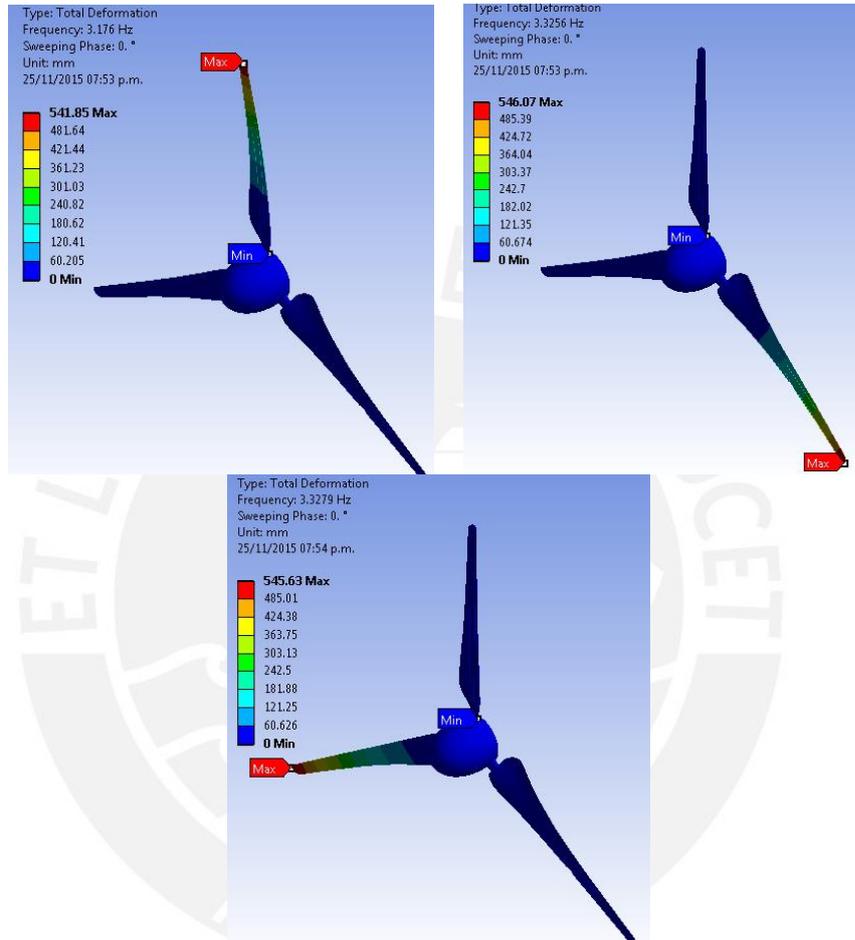


Figura 2.22. Modos de vibración de la hélice para el caso 3.

Tabla 2.8. Valores de los modos de vibrar y frecuencias naturales en el caso 3.

Modo	Modo de vibración	Frecuencia Natural (Hz)	Velocidad (rpm)
1,2,3	Flexión	[3.176 ; 3.3256 ; 3.3279]	[190.56 ; 199.536 ; 199.674]
4,5,6	Flexión – Torsión	[5.979 ; 6.1953 ; 6.1988]	[358.741 ; 371.719 ; 371.929]

Como se puede ver en la tabla 2.9, la velocidad que se consideraría crítica es igual a 190.56 rpm, ya que ésta se acerca más a la de funcionamiento a pesar de estar alejada en gran magnitud.

2.7. Análisis modal de la hélice mediante método analítico

Como en los anteriores puntos estudiados, para validar la simulación numérica, se realizó un análisis modal analítico de la hélice, para así poder comparar los diferentes modos de vibrar por flexión y torsión. Para el presente análisis, se debe de considerar lo siguiente:

- Se asume que el material se comporta de forma linealmente elástica.
- Se asume que el sistema cuenta solo con un grado de libertad para cada caso.
- Se asume que las palas son vigas empotradas en el domo por lo que este se considera como apoyo tipo empotramiento (se genera 3 fuerzas y 3 momentos).

Una vez delimitados los puntos anteriores, se procede a realizar el cálculo de las frecuencias naturales por flexión y torsión por separado, debido a que el sistema se asume de un grado de libertad, las palas de la hélice del aerogenerador detallado en el ANEXO 6. Además, para este análisis se simplificó el sistema en uno de un grado de libertad sin amortiguamiento; cabe resaltar que para estos dos casos a analizar se asume a cada pala como una viga empotrada.

2.8. Comparación de resultados

A continuación, se realizará una comparación de resultados entre los obtenidos mediante simulación numérica con los hallados mediante métodos analíticos del análisis aerodinámico, el análisis estructural y el análisis modal de la hélice.

2.8.1 Comparación de resultados del análisis aerodinámico

En la tabla 2.9, se puede apreciar la comparación de torque por pala, el torque para la hélice completa y las potencias obtenidas mediante el análisis analítico y mediante la simulación numérica. Se aprecia que la diferencia obtenida entre ambos métodos asciende en un valor aproximado de 36%.

Tabla 2.9. Comparación de potencia obtenida en el análisis analítico y mediante simulación numérica del fenómeno aerodinámico.

-	Analítico	Simulación
Torque por pala (N.m)	513.842	803.84
Torque hélice (N.m)	1 541.526	2 411.52
Potencia hélice (kW)	19.371	30.304
Variación	36%	

2.8.2 Comparación de resultados del análisis estructural de la hélice

En la tabla 2.10, se puede apreciar la comparación del esfuerzo equivalentes máximos en la sección más crítica considerada para el análisis al realizar la comparación de los valores obtenidos mediante el análisis analítico y mediante la simulación numérica. Se aprecia, que la variación obtenida entre ambos métodos haciendo a un valor aproximado de 14.84% además se obtiene un factor de seguridad de 1.3 sobre las palas de la hélice. Por lo que se puede verificar; que las aproximaciones usadas en el cálculo analítico son adecuadas para la realización del cálculo.

Tabla 2.10. Comparación de esfuerzos máximos obtenidos en el análisis analítico y mediante simulación numérica en la sección crítica.

-	Analítico	Simulación
Esfuerzo (MPa)	9.64	8.2098
Variación	14.84 %	

2.8.3 Comparación de resultado del análisis modal de la hélice

En la tabla 2.11, se detalla la comparación realizada entre los resultados de frecuencias naturales por flexión y torsión obtenidos con el cálculo analítico y mediante la simulación numérica. Se puede observar, que existe una alta variación en las frecuencias debidas a la flexión esto se debe porque en el análisis analítico se consideró que la sección a lo largo de la pala de la hélice es igual a la sección promedio. Por otro lado; con respecto a la frecuencia debido a la torsión se aprecia que la variación no es tan alta.

Tabla 2.11. Comparación de frecuencias naturales obtenidas en el análisis analítico y mediante simulación de la hélice.

-	Analítico	Simulación	Variación
Frecuencia natural en (Hz) por Flexión	5.747	2.083	63.76 %
Frecuencia natural en (Hz) por Torsión	6.06	5.2442	13.46 %

CAPÍTULO 3

ESTUDIO ESTRUCTURAL Y MODAL DE LA TORRE Y GÓNDOLA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

3.1. Introducción

En el presente capítulo se detallará el análisis que se realizó en la torre y góndola mediante simulación numérica con el uso del método de los elementos finitos con ayuda del software ANSYS MECHANICAL. Para esto se realizó el análisis de la torre en posición de funcionamiento bajo diferentes condiciones de carga (de trabajo, de viento, de sismo y de combinaciones de cargas) e izaje; luego se analizaron los elementos eje principal, codo y el conjunto de la góndola. Para los análisis mediante simulación numérica computacional con aplicación del método de los elementos finitos con ayuda de un software computacional se debe considerar las siguientes etapas básicas:

a) Pre – procesamiento:

En esta etapa se realiza el modelado 3D del sistema a analizar, además se debe de indicar los parámetros bases para la simulación; como definir las propiedades del material, las condiciones de borde y realizar un mallado del modelo.

b) Procesamiento:

En esta etapa el software computacional, el usado en esta etapa de la tesis es el ANSYS MECHANICAL, se encarga de resolver las ecuaciones diferenciales que definen el problema en cada uno de los elementos generados.

c) Post – procesamiento:

En esta etapa el software luego de realizar el análisis en los diferentes puntos del sistema, procesa los resultados en base a las solicitaciones que se indican en la etapa de procesamiento; en esta etapa se obtienen las reacciones en apoyos, desplazamientos totales o longitudinales, esfuerzos, entre otras.

3.2. Análisis de la torre en posición de funcionamiento

Se procedió a analizar la torre en posición de funcionamiento mediante simulación numérica computacional con el método de los elementos finitos. Con el presente análisis, se buscó obtener las reacciones en la base, así como los esfuerzos y desplazamientos que sufre la torre para su interpretación bajo diferentes condiciones de carga (de trabajo, de viento, de sismo y combinaciones de cargas). Luego se procedió a realizar un análisis de estabilidad, y finalmente realizar el cálculo de la frecuencia natural de la torre.

3.2.1. Análisis de la torre con carga de trabajo

- Cálculo de cargas reacciones, desplazamientos y esfuerzos

En primer lugar se realizó el modelo 3D de la torre mostrada en la figura 3.1 con ayuda del software Autodesk Inventor 2016, para luego poder exportarlo al software ANSYS MECHANICAL.



Figura 3.1. Modelo CAD de la torre para análisis en funcionamiento.

3.2.1.1. Etapa de pre – procesamiento

En esta etapa se define en primera instancia el modelo analizar, el cual está conformado por cuatro partes. Los elementos que conforman la torre se pueden apreciar en la figura 3.2.

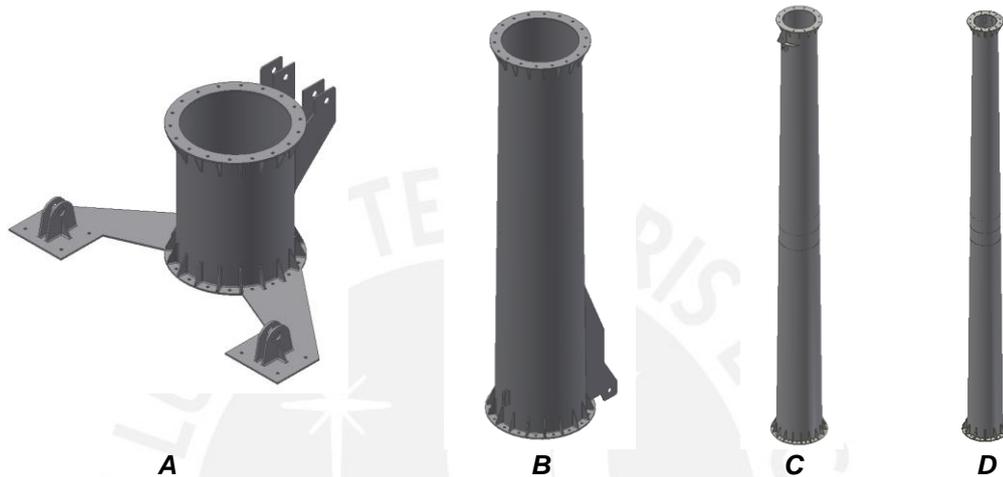


Figura 3.2. Elementos que conforman la torre. A) Base. B) Segmento base. C) Segmento intermedio. D) Segmento tope.

Una vez exportado el modelo de la torre en el programa ANSYS MECHANICAL se procedió a realizar el mallado de este, el cual cuenta con las siguientes características:

- Elementos Tetraédricos.
- N° de nodos y N° de elementos: 604 769 y 321 437 respectivamente.
- Tamaño de la malla varia en el rango de $40 \leq x \leq 230$ mm.
- Tamaño de malla entre nervios y esquinas refinado en el rango de $5.5 \leq x \leq 8$ mm.
- Element Quality, Skewness y Othogonal Quality con valores mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de los parámetros de la calidad de malla.

Parámetro	Valor
Element Quality	0.5978
Skewness	0.5149
Orthogonal quality	0.6364

En las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se presentan los mallados de los cuatro elementos que conforman la torre del aerogenerador y algunos detalles importantes en las zonas más relevantes.

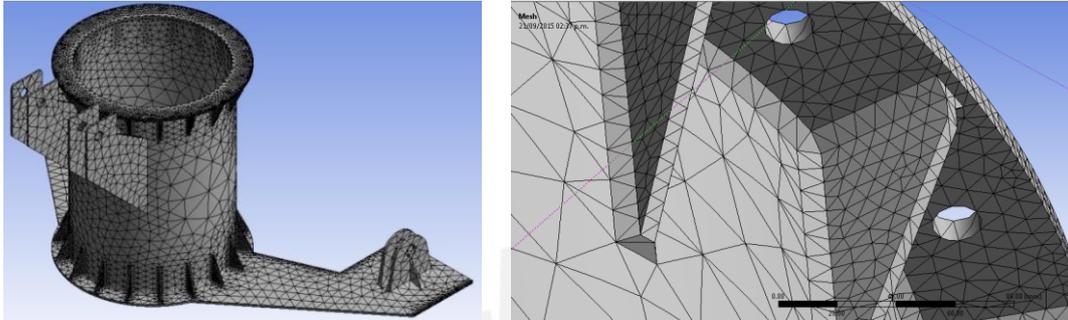


Figura 3.3. Mallado de la base de la torre.

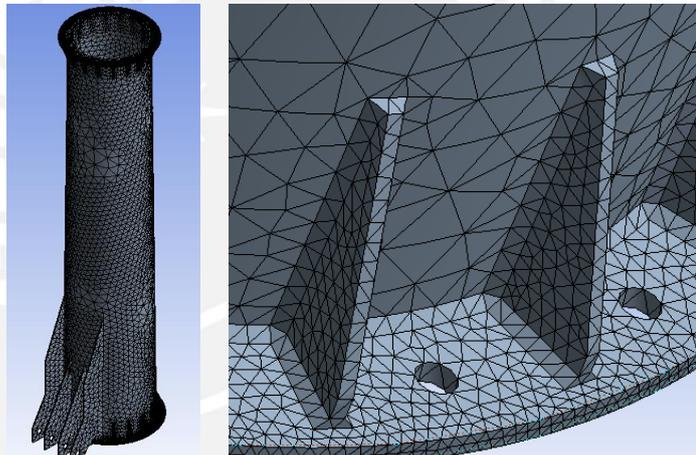


Figura 3.4. Mallado del segmento base de la torre.

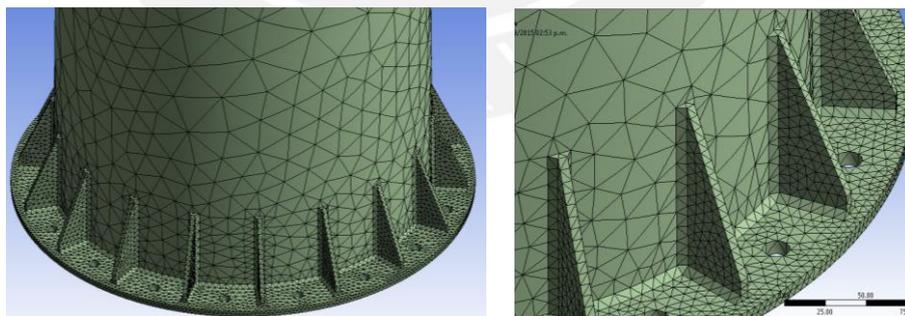


Figura 3.5. Mallado del segmento intermedio de la torre.

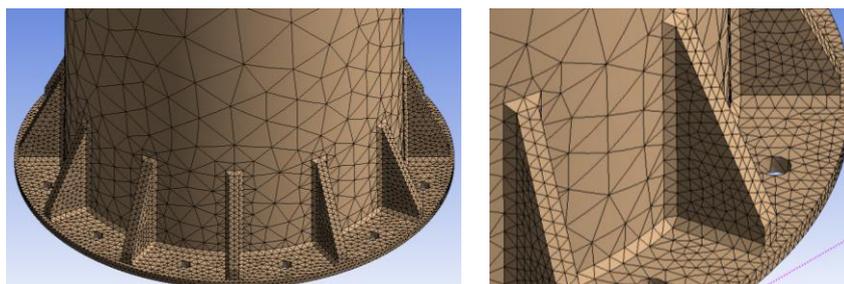


Figura 3.6. Segmento tope de la torre.

Luego de mallados los elementos, se procedió a indicar las condiciones de borde mostradas en la figura 3.7, las cuales se detallan a continuación:

- Apoyo fijo en la base, movimiento y giro restringido en los ejes.
- Gravedad de la tierra, 9.81 m/s^2 .
- Fuerza de empuje aerodinámico debido al giro de la hélice, $9\,506 \text{ N}$, ver Anexo 7.
- Momento generado por el giro de las palas, $3\,250 \text{ N.m}$, ver Anexo 7.
- Masa distribuida en la parte superior de la torre debido al peso de los componentes de la góndola y hélice, $12\,262.5 \text{ N}$, ver Anexo 7.

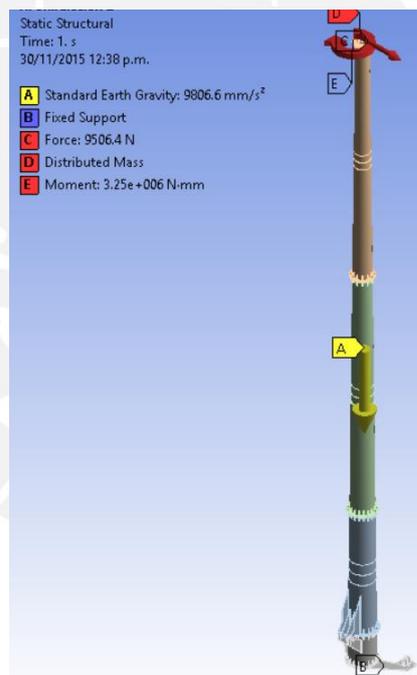


Figura 3.7. Condiciones de borde sobre la torre.

3.2.1.2. Etapa de procesamiento

En esta etapa el software computacional se encarga de analizar y calcular los resultados necesarios en base a la solicitud. La simulación puede tardar en ser resuelta dependiendo de la cantidad de condiciones impuestas y elementos generados. Para el caso de la presente tesis se realizó un estudio de independencia de malla para el análisis estructural de la torre mostrado en el Anexo 8 con el cual se

buscó obtener un modelo con el que se logre llegar a resultados validos en el menor tiempo posible de simulación.

3.2.1.3. Etapa de post – procesamiento

En esta etapa se obtuvo las gráficas y valores de las reacciones en la base, los desplazamientos y esfuerzos que presenta la torre en toda su geometría. En la figura 3.8 se puede apreciar los desplazamientos que sufre la torre en toda su longitud y la máxima ubicada en la parte superior de esta siendo igual a 223.4 mm.

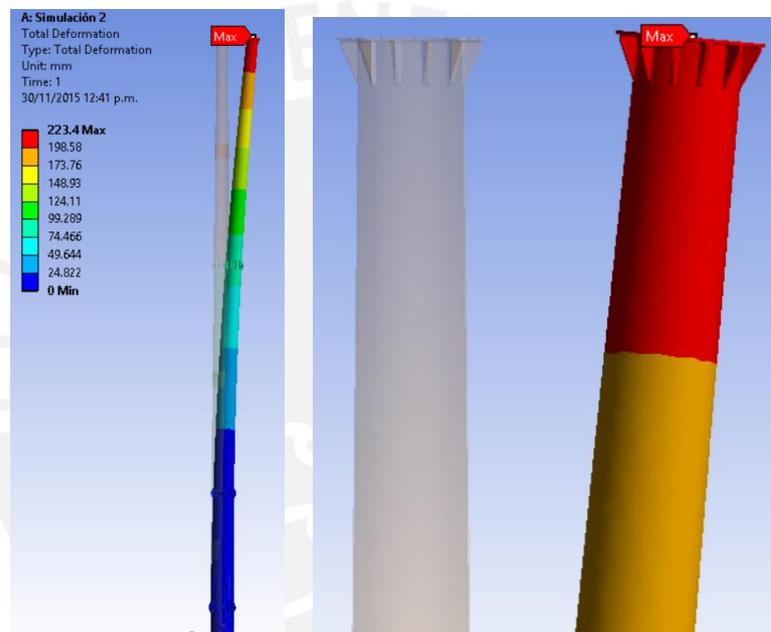


Figura 3.8. Desplazamiento (mm) de la torre.

En la figura 3.9 se puede apreciar la distribución de esfuerzos sobre la torre, además se aprecia que el desplazamiento máximo es igual a 159.77 MPa se da en uno de los nervios del segmento base y que en la base el desplazamiento en una sección no influenciada por los nervios y que se usará para la comparación con el cálculo analítico es igual a 120.37 MPa.

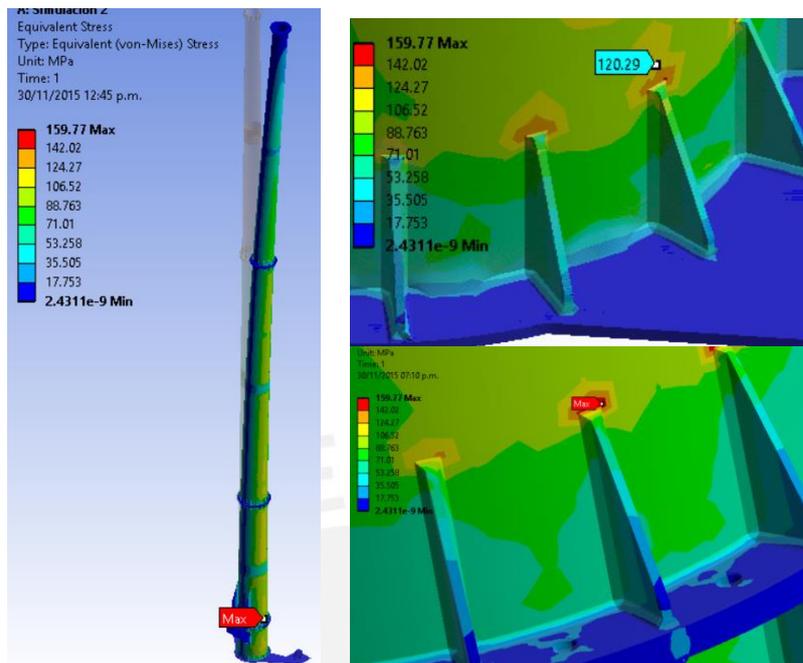


Figura 3.9. Esfuerzos (MPa) sobre la torre.

En cuanto a las reacciones en la base se obtuvieron en la simulación los siguientes valores mostrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Reacciones en la base de la torre.

Carga	Magnitud	Unidad
Reacción en x	9 506.4	N
Reacción en y	23 352	N
Momento	148 640	N.m

3.2.2. Análisis de la torre con carga de viento

Para poder realizar el análisis de la torre bajo cargas de viento, se procedió a realizar el cálculo de las fuerzas del viento en toda la longitud de la torre por lo que se hizo uso la norma E.020 del Reglamento Nacional de Edificaciones y es detallado en el Anexo 9. Luego de identificadas las cargas sobre la torre se procede a realizar el análisis mediante simulación numérica para la cual se usa el modelo geométrico y malla usado en el análisis previo de la torre en funcionamiento. Sin embargo en este caso se debe tomar en cuenta que para este análisis las condiciones de borde se les debe de adicionar la fuerza debida al viento calculada en el Anexo 9. En la figura 3.10 se muestran las condiciones de borde para este caso de análisis.

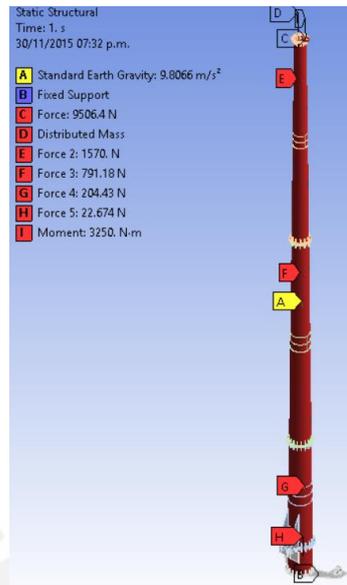


Figura 3.10. Condiciones de borde sobre la torre con carga de viento.

Una vez indicados todos los parámetros necesarios se obtuvieron los siguientes resultados de reacciones, desplazamientos y esfuerzos. En la tabla 3.3 se aprecia las reacciones obtenidas en la base de la torre; por otro lado en la figura 3.11 se muestra el desplazamiento que sufre la torre y que está localizada en la parte superior de la torre equivalente a 250.88 mm. Finalmente en la figura 3.12, se muestra la distribución de esfuerzos sobre la torre y que estos alcanzan un valor máximo de 185.25 MPa cerca a los nervios del segmento base y que si bien sufre un aumento este no es tal que sobrepase el esfuerzo límite del material de los componentes de la torre.

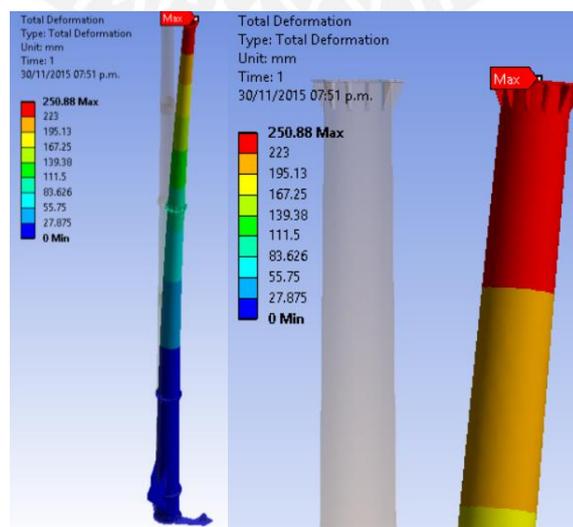


Figura 3.11. Desplazamiento (mm) en sentido x sobre la torre sometida a carga de viento.

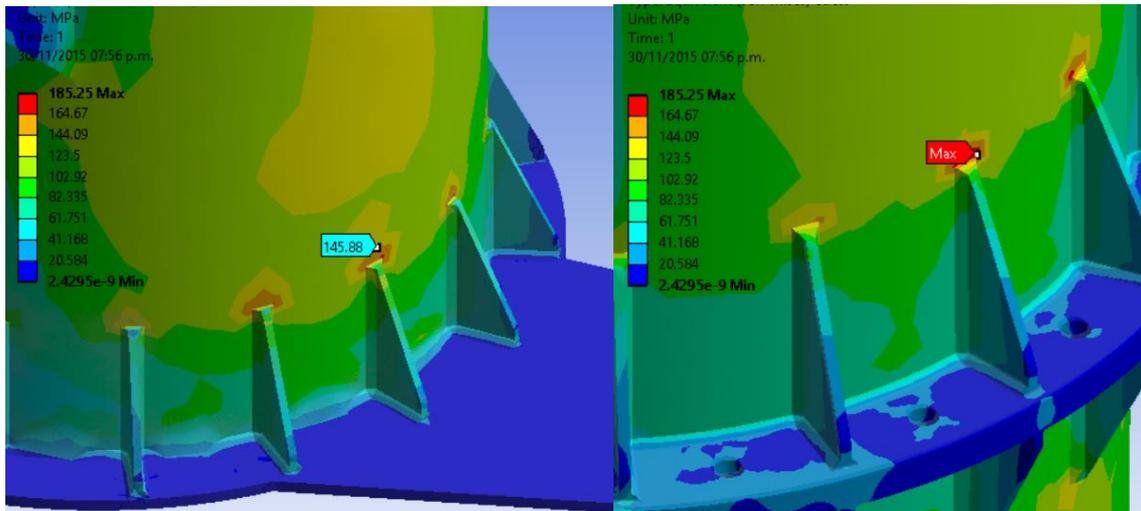


Figura 3.12. Esfuerzos (MPa) sobre la torre sometida a carga de viento.

Tabla 3.3. Reacciones en la base de la torre.

Reacción en X (N)	12 095
Reacción en Y (N)	23 352
Reacción en Z (N)	0.0972

3.2.3. Análisis de la torre con carga sísmica

De igual manera que para el caso del análisis de la torre bajo carga de viento en el Anexo 10 se detalla el procedimiento de cálculo de la cortante basal la cual se usará en el presente análisis mediante el uso de la norma E.030. El valor de la cortante basal (V) es igual a 5 355 N, la cual será aplicada en la parte superior de la torre para su análisis ya que se considera que no existe otro punto que aporte rigidez lateral necesaria a lo largo de la torre y debido a que se considera como un caso crítico colocarla en esta posición. Luego de identificada esta carga se adiciona ésta sobre la torre para realizar el análisis mediante simulación numérica para la cual se usa el modelo geométrico y malla usados en el análisis previo de la torre en funcionamiento. Sin embargo en este caso se debe tomar en cuenta que para este análisis a las condiciones de borde se les debe de adicionar esta fuerza debida al sismo calculada en el Anexo 10, ver figura 3.13.

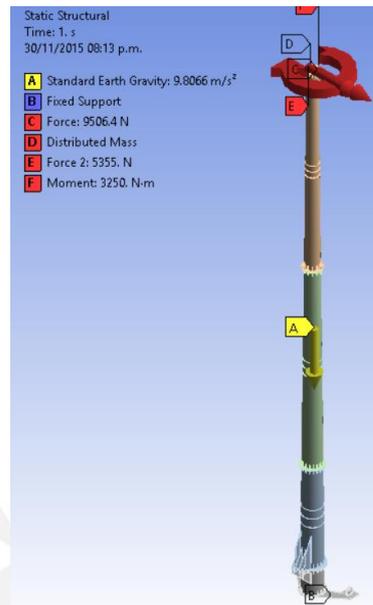


Figura 3.13. Condiciones de borde sobre la torre sometida a carga sísmica.

Una vez indicados todos los parámetros necesarios se obtuvieron los siguientes resultados de reacciones, desplazamientos y esfuerzos. En la tabla 3.4, se aprecia las reacciones obtenidas en la base de la torre; por otro lado en la figura 3.14, se muestra el desplazamiento que sufre la torre y que está localizada en la parte superior de la torre equivalente a 348.96 mm. Finalmente en la figura 3.15, se muestra la distribución de esfuerzos sobre la torre y que estos alcanzan un valor máximo de 247.82 MPa por los nervios del segmento base y que si bien sufre un aumento en esta zona no es tal que sobrepase el esfuerzo límite del material de los componentes de la torre.

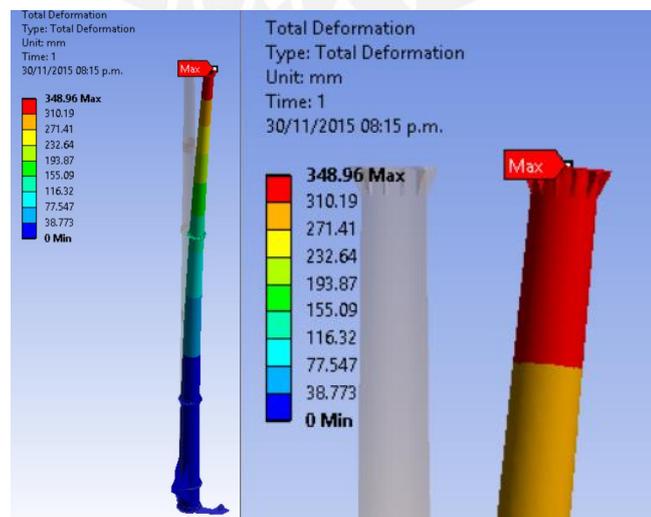


Figura 3.14. Desplazamiento (mm) en la dirección x sobre la torre sometida a carga sísmica.

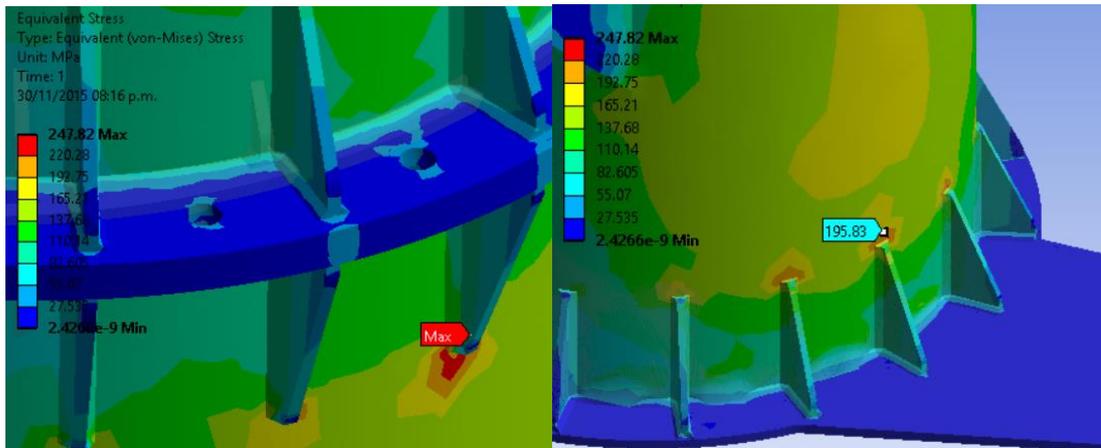


Figura 3.15. Esfuerzos (MPa) sobre la torre sometida a carga sísmica.

Tabla 3.4. Reacciones en la base de la torre

Reacción en X (N)	14 861
Reacción en Y (N)	23 352
Reacción en Z (N)	$0.00067645 \times 10^{-4}$

3.2.4. Análisis de la torre bajo diferentes combinaciones de cargas según método LRFD

Para poder conocer el comportamiento de la torre bajo diferentes condiciones de cargas se realizó el análisis de la torre por el método de Factores de Carga y Resistencia (LRFD) en base a las normas E.020 y E.090 del reglamento nacional de edificaciones. En primer lugar en base a estas normas, se procede a definir las siguientes ecuaciones de combinación de cargas:

- D
- D + W
- $0.75 \cdot (D + L + W)$
- D + L
- D + 0.7·E
- $0.75 \cdot (D + L + 0.7 \cdot E)$

En donde:

- D: Carga muerta.
- W: Carga de viento.
- L: Carga viva.
- E: Carga de sismo.

Una vez definidas todas las combinaciones de cargas en base a lo antes mencionado se procedió a realizar el análisis sobre la torre mediante simulación numérica. Para esto se usa el modelo geométrico y malla usado en el análisis previo de la torre en funcionamiento. Sin embargo, en este caso se debe tomar en cuenta que el análisis las condiciones de borde varía según cada configuración dada por combinaciones de

carga antes descritas. A continuación, se presentarán en la tabla 3.5 las reacciones en la base calculadas para cada combinación de carga. Por otro lado en la figura 3.16, se muestran las diferentes desplazamientos obtenidas a partir de cada combinación de carga, con una variación de 0.217 mm a 250.88 mm en la parte superior de la torre. Finalmente en la figura 3.17, se muestra la ubicación del esfuerzo máximo en la torre para cada caso de combinación de carga, que como se puede ver varía de 5.235 MPa a 185.25 MPa, siendo estos valores no lo suficientemente significativos para que falle la torre.

Tabla 3.5. Reacciones en la base de la torre.

Combinación	En el eje x (N)	En el eje y (N)	En el eje z (N)
D	2.97×10^{-5}	23 352	6.27×10^{-5}
D + L	9 506.4	23 352	2.89×10^{-4}
D + W	12 095	23 352	9.72×10^{-2}
D + .7·E	3 748	23 352	2.47×10^{-4}
.75·(D + L + W)	9 071	20 262	6.17×10^{-5}
.75·(D + L + .7·E)	9 940.8	20 262	2.87×10^{-4}

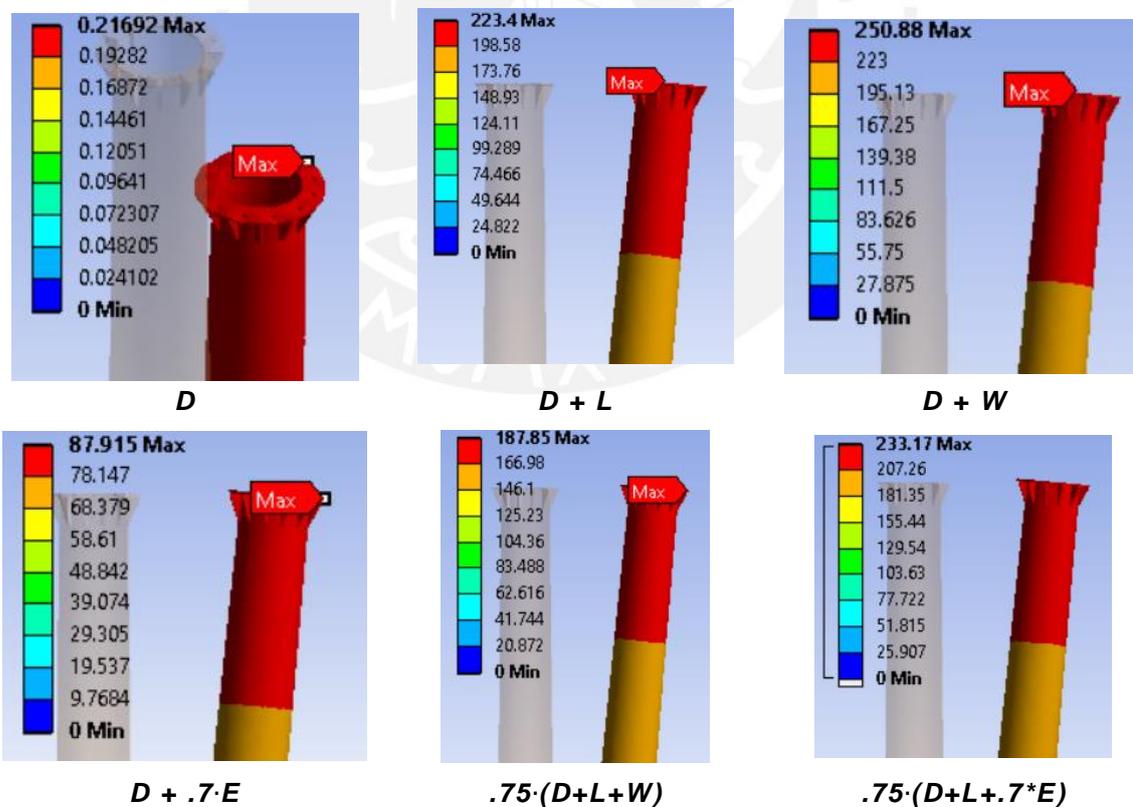


Figura 3.16. Desplazamiento (mm) de la torre en las diferentes combinaciones.

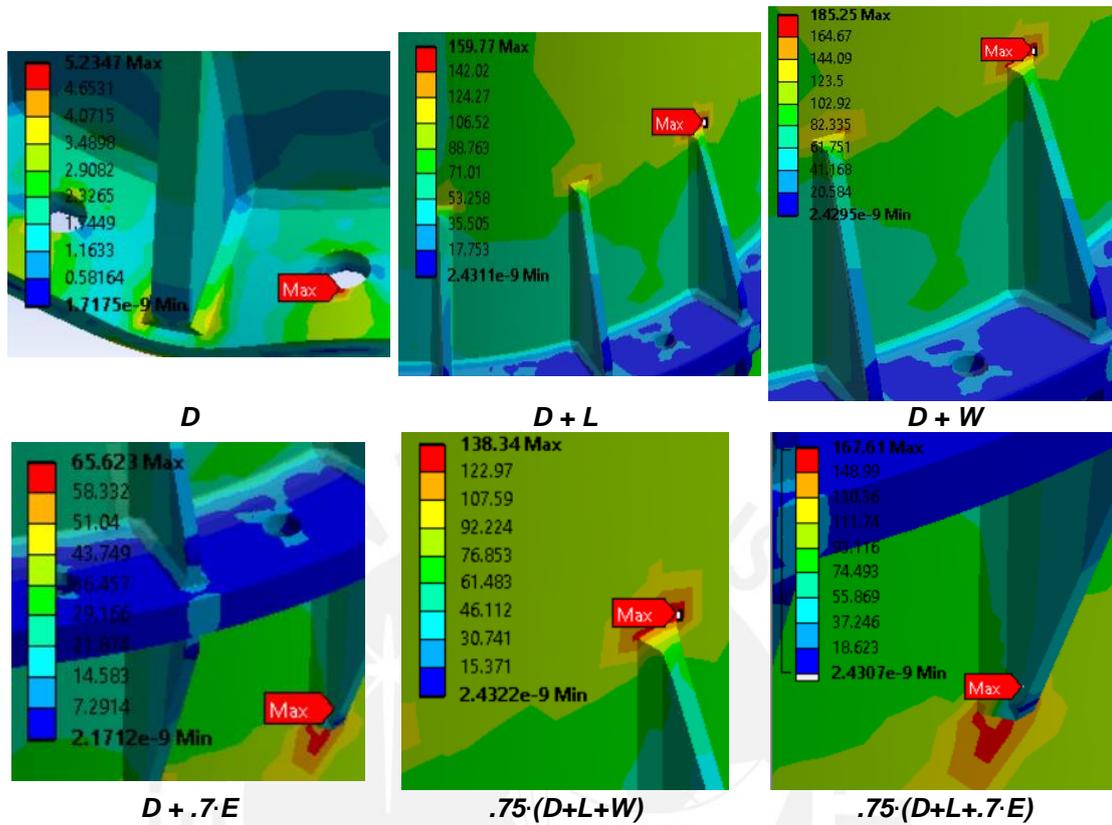


Figura 3.17. Esfuerzos (MPa) de la torre en las diferentes combinaciones.

3.2.5. Análisis de estabilidad

Para el análisis por pandeo se usó la misma información y se llevó a cabo las mismas etapas de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento que en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos; por lo que cabe resaltar que se usaron los mismos elementos con la malla ya realizada y las condiciones de borde antes dadas. Con este análisis se logra obtener un factor multiplicador, que nos indica en cuanto debería de aumentar la fuerza actuante sobre la torre para que esta falle por pandeo. En la figura 3.18 se puede apreciar que este valor es igual a 30.814.

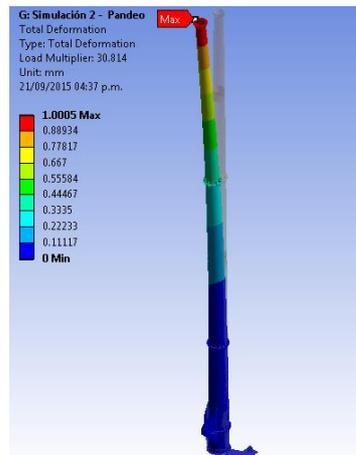
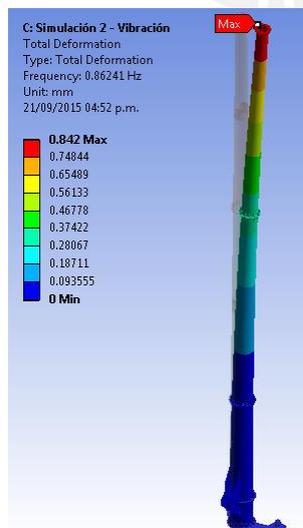


Figura 3.18. Resultados del análisis por pandeo de la torre.

3.2.6. Cálculo de frecuencia natural de la torre

Para el cálculo de la frecuencia natural de la torre se usó la misma información y se llevó a cabo las mismas etapas de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento que en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos; por lo que cabe resaltar que se usaron los mismos elementos con la malla ya definida y las condiciones de borde antes mencionadas. Con este análisis se logra calcular el valor de la primera frecuencia natural de la torre que es igual a 0.8624 Hz. En la figura 3.19 se puede apreciar el desplazamiento para el primer modo de vibración de la torre al realizar el análisis modal de la torre y además se muestran las 6 primeras frecuencias naturales, correspondientes a los 6 primeros modos de vibración.



Modos de vibración de la torre	
Casos	Frecuencia (Hz)
Modo 1	0.8624
Modo 2	0.8714
Modo 3	8.4261
Modo 4	8.5391
Modo 5	24.641
Modo 6	24.843

Figura 3.19. Resultados del análisis modal de la torre correspondiente al primer modo de vibración.

3.3. Análisis de la torre en posición de izaje

Con el presente análisis se obtendrán las reacciones así como los desplazamientos y esfuerzos que sufre la torre. En primer lugar, se realizó el modelo 3D mostrado en la figura 3.20 con ayuda del software Autodesk Inventor 2016, para luego poder exportarlo al software ANSYS MECHANICAL.



Figura 3.20. Modelo CAD de la torre para análisis en izaje.

3.3.1. Cálculo de reacciones, desplazamientos y esfuerzos

3.3.1.1. Etapa de pre – procesamiento

En esta etapa se define en primera instancia el modelo a analizar, el cual estará conformado por 4 partes como el análisis analítico y se le adicionará una bocina que permite el giro y unión entre el segmento base y la base; además de esto se cuenta con el tirante y el puntal, los cuales sirven para el izaje de la torre mostrados en la figura 3.21.

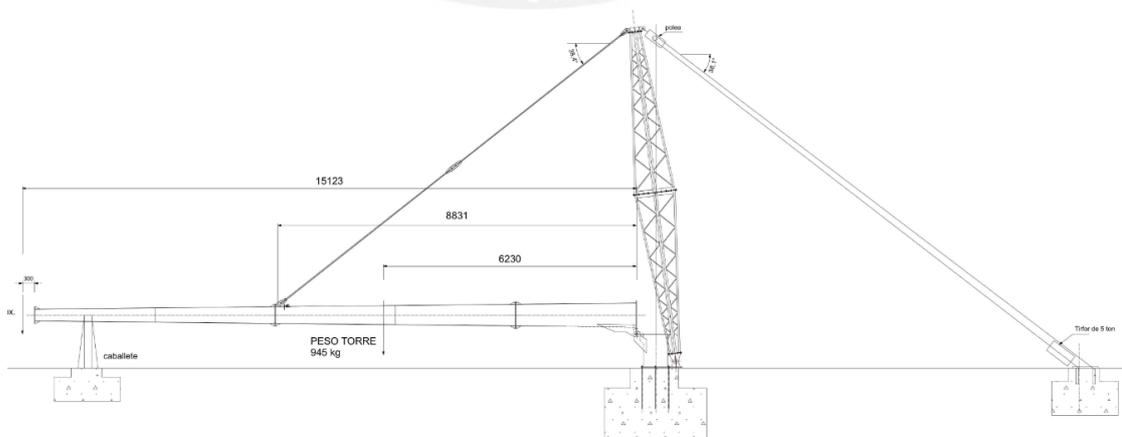


Figura 3.21. Plano con las diferentes partes para el izaje de torre.

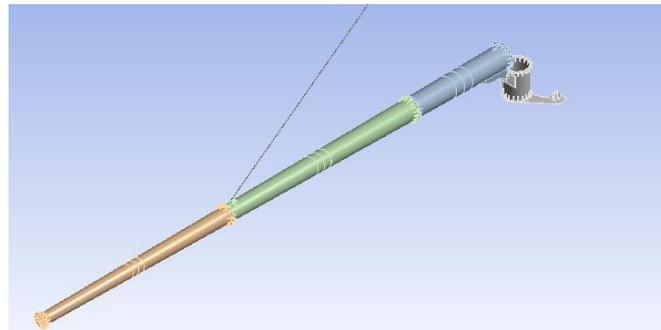


Figura 3.22. Modelo de la torre en ANSYS para el análisis en izaje.

Una vez exportado el modelo de la torre al Workbench (ver figura 3.22) del programa ANSYS MECHANICAL, se procedió a realizar el mallado de este, el cual cuenta con las siguientes características:

- Elementos Tetraédricos.
- N° de nodos y N° de elementos: 727 098 y 397 977 respectivamente.
- Tamaño de malla varia en el rango de $40 \leq x \leq 240$ mm.
- Tamaño de malla entre nervios y esquinas en el rango de $6.5 \leq x \leq 7$ mm.
- Parámetros de malla mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores de los parámetros de malla.

Parámetro	Valor
Element Quality	0.6433
Skewness	0.4619
Orthogonal quality	0.6790

En las figuras 3.23, 3.24, 3.25 y 3.26 se presentan los mallados de los cuatro elementos que conforman la torre del aerogenerador para el análisis en izaje.

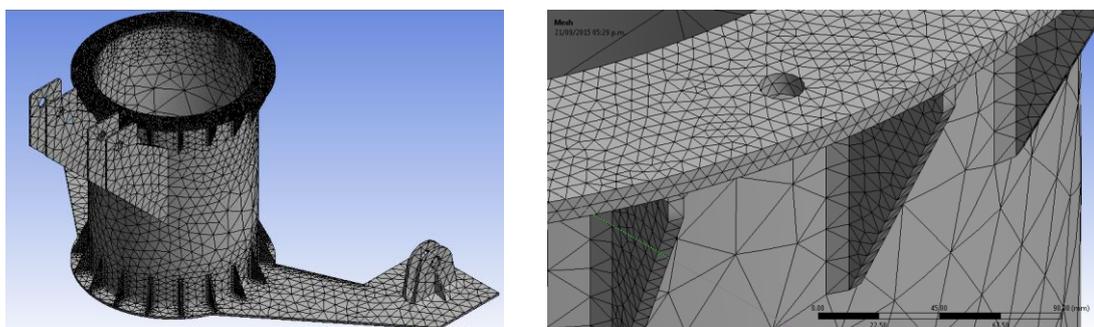


Figura 3.23. Mallado de la base de la torre.

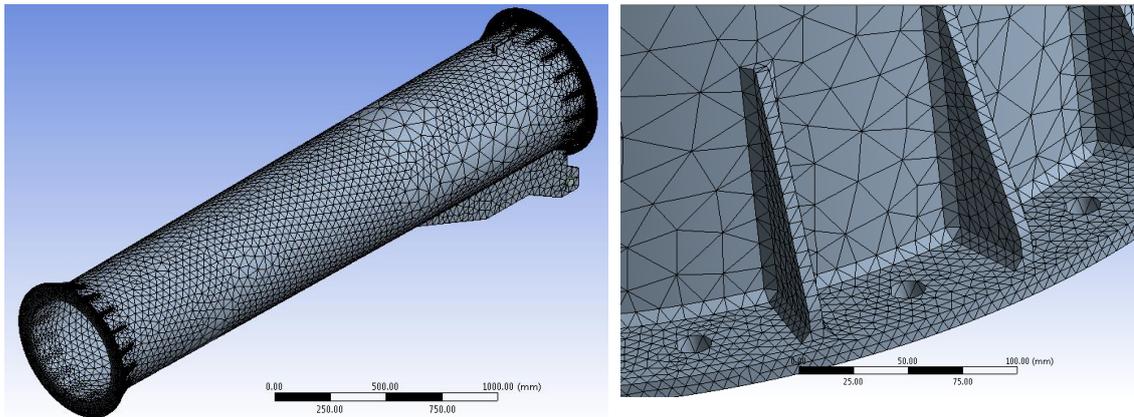


Figura 3.24. Mallado del segmento base de la torre.

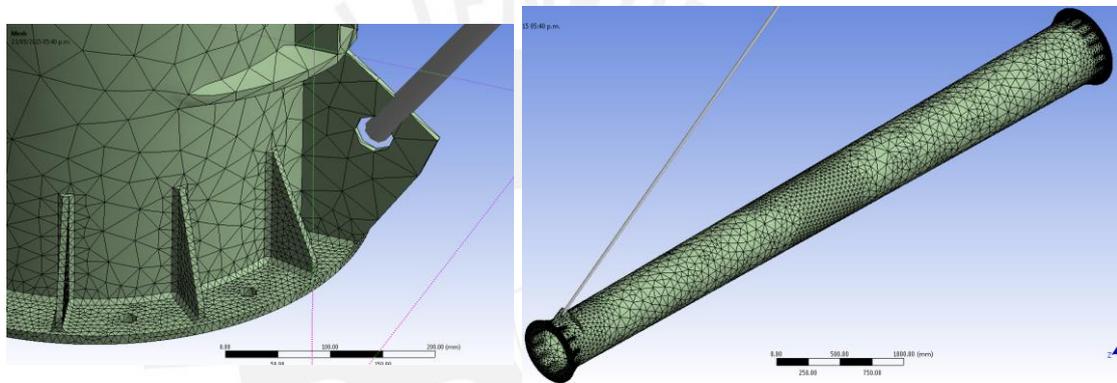


Figura 3.25. Mallado del segmento intermedio de la torre.

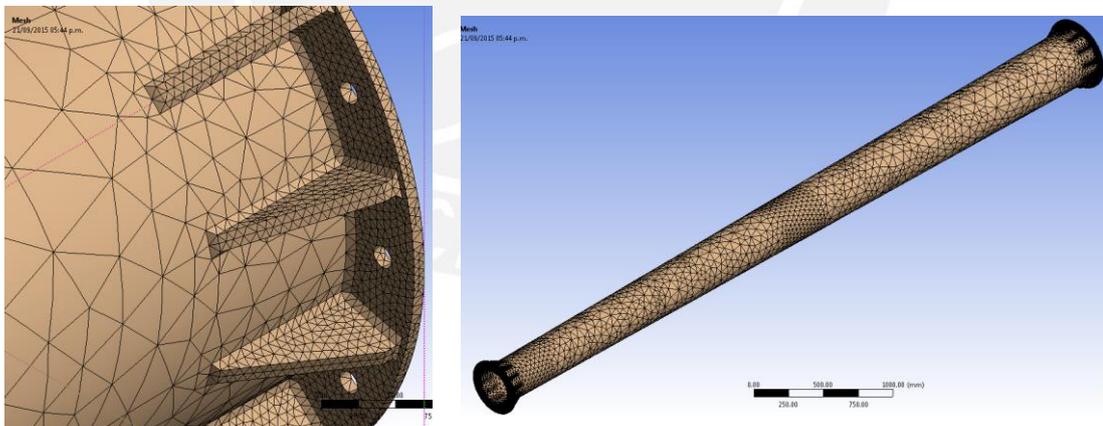


Figura 3.26. Mallado del segmento tope de la torre.

Una vez mallado los elementos se procedió a indicar las condiciones de borde mostradas en la figura 3.27, las cuales se detallan a continuación:

- a) Apoyo fijo en la base, movimiento y giro restringido en los ejes.
- b) Gravedad de la Tierra, 9.81 m/s^2 .

- c) Se considerara un elemento Beam, con las características geométricas del tirante para simplificación de cálculo.
- d) Se considera que entre la conexión el segmento base y la base existe movimiento rotativo.
- e) Se considera en la parte superior de la torre, una fuerza que representa el peso de los componentes de la góndola y hélice, 1 250 kg, ver Anexo 7.

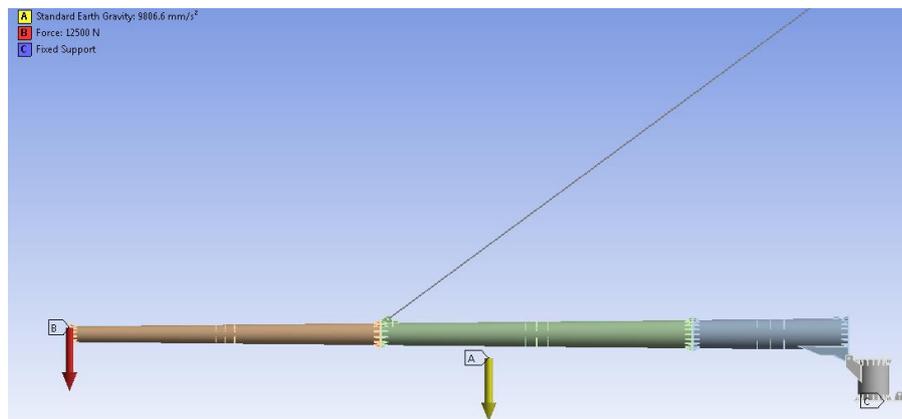


Figura 3.27. Condiciones de borde sobre la torre en el izaje.

3.3.1.2. Etapa de procesamiento

En esta etapa el software computacional se encarga de analizar y calcular los resultados necesitados en base a la solicitud.

3.3.1.3. Etapa de post – procesamiento

En esta etapa se obtuvo las gráficas y valores de las reacciones en la base, los desplazamientos y esfuerzos que presenta la torre en toda su geometría. En la figura 3.28 se puede apreciar los desplazamientos que sufre la torre en toda su longitud y la máxima ubicada en la parte superior de esta siendo igual a 94.779 mm.

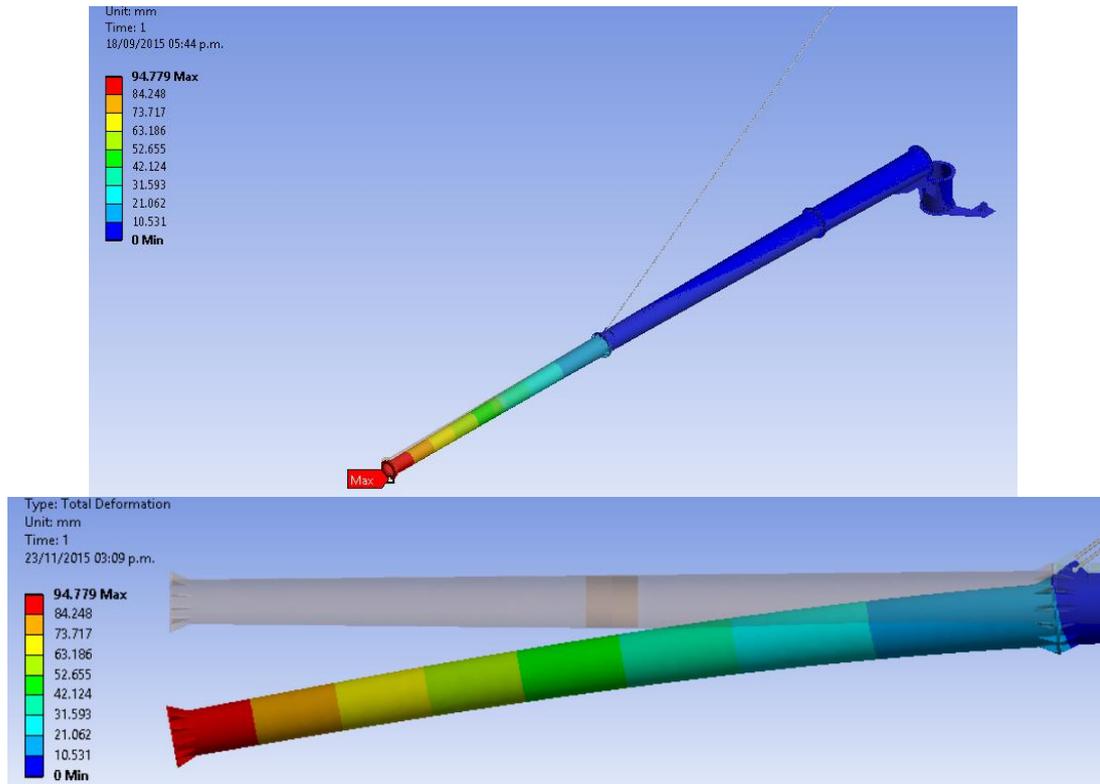
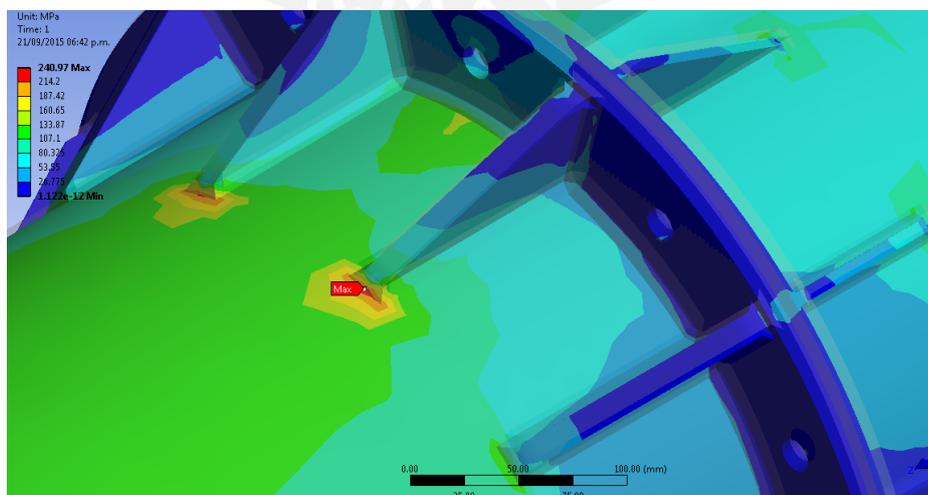


Figura 3.28. Desplazamiento (mm) de la torre en el izaje.

En la figura 3.29 se puede apreciar la distribución de esfuerzos sobre la torre, además se aprecia que el esfuerzo máximo es igual a 240.97 MPa se da cerca a uno de los nervios del segmento tope y que en este mismo segmento el desplazamiento en una sección no influenciada por los nervios, y que se usará para la comparación con el cálculo analítico, es igual a 129. 83 MPa.



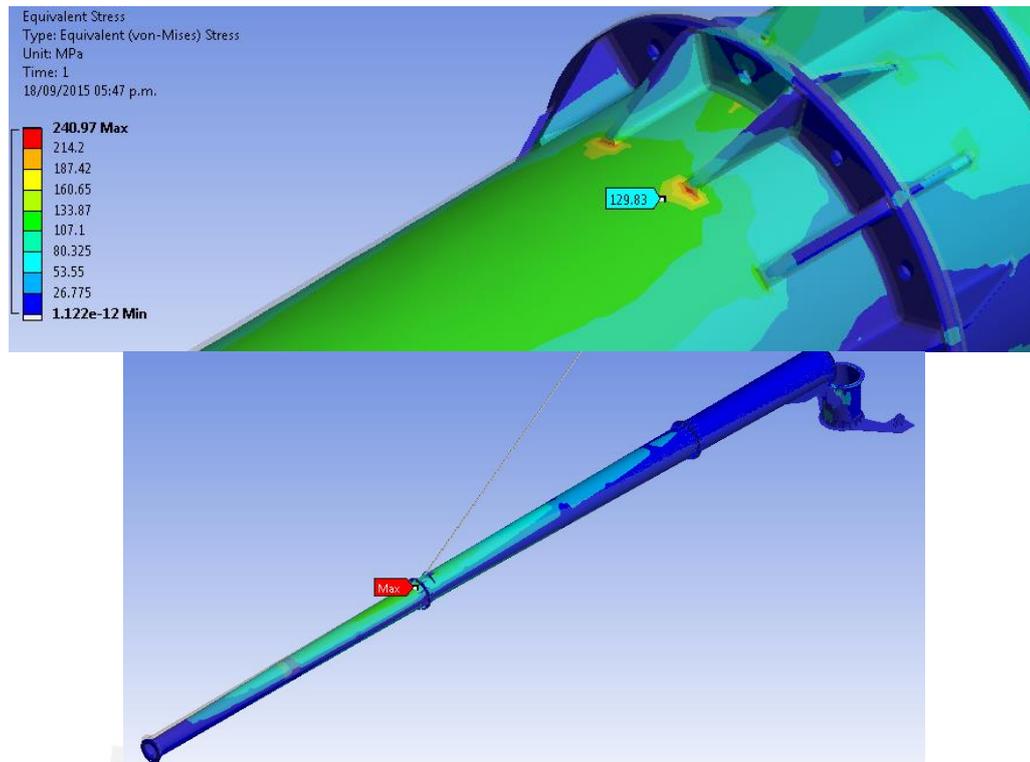


Figura 3.29. Esfuerzos (MPa) sobre la torre en el izaje.

En cuanto a las reacciones en la bocina la cual permite el giro del segmento base con respecto a la base se obtuvieron los siguientes valores:

- Reacción en x = 33 883 N.
- Reacción en y = 2 982.6 N.

Además con ayuda del software se extrae la fuerza que se necesita para poder izar la torre, la cual es ejercida en el tirante e igual a:

- Fuerza en el tirante = 42 297 N .

3.4. Análisis estructural de la góndola mediante simulación numérica

Para el respectivo análisis de la góndola se consideró el estudio del conjunto de elementos de la góndola, el eje principal y codo individualmente.

- a) Ensamble de góndola
- b) Eje principal
- c) Codo

3.4.1. Análisis de ensamble de góndola

En el presente análisis se busca estudiar el comportamiento del conjunto de elementos (eje principal, rueda generador, soporte estator y codo) que conforman la góndola mediante simulación numérica computacional.

3.4.1.1. Cálculo de desplazamientos y esfuerzos

En el análisis se obtuvieron las reacciones así como los desplazamientos y los esfuerzos que sufre la góndola al analizarla ensamblada con sus componentes principales (eje principal, rueda generador, soporte estator y codo). En primer lugar se realizó el modelo 3D mostrado en la figura 3.30 con ayuda del software Autodesk Inventor 2016 para luego poder exportarlo al software ANSYS MECHANICAL.

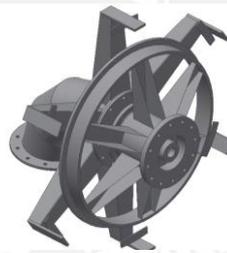
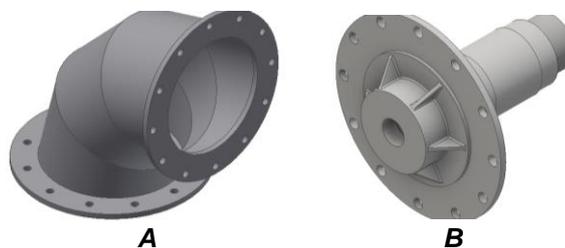


Figura 3.30. Góndola ensamblada con sus principales partes.

3.4.1.1.1. Etapa de pre – procesamiento

En esta etapa se define en primera instancia el modelo a analizar, el cual estará conformado por el codo, el eje principal, el soporte estator y la rueda del generador mostrados en la figura 3.31. Por otro lado en la figura 3.32 se muestra ya el ensamble de estos elementos exportado en el programa ANSYS MECHANICAL.



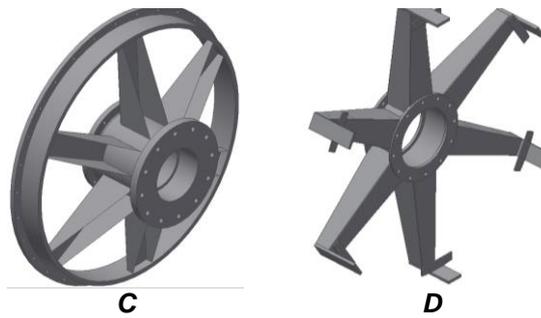


Figura 3.31. Elementos para el análisis del ensamble de la góndola. A) Codo. B) Eje Principal. C) Rueda generador. D) Soporte estator.

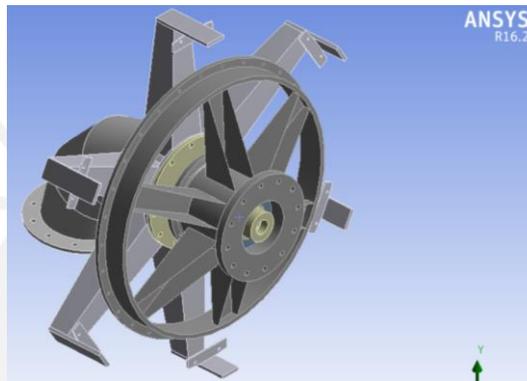


Figura 3.32. Modelo del ensamble de la góndola en ANSYS.

Una vez exportado el modelo de la góndola al programa ANSYS MECHANICAL se procedió a realizar el mallado de este, el cual cuenta con las siguientes características:

- Elementos Tetraédricos.
- N° de nodos y N° de elementos: 535 581 y 293 070 respectivamente.
- Tamaño de malla varia en el rango de $10 \leq x \leq 380$ mm.
- Element Quality, Skewness y Othogonal Quality con valores mostrados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Valores de los parámetros de malla.

Parámetro	Valor
Element Quality	0.7001
Skewness	0.3762
Orthogonal quality	0.7285

En las figuras 3.33 y 3.34 se presentan los mallados de los cuatro elementos que conforman la góndola del aerogenerador para el análisis.

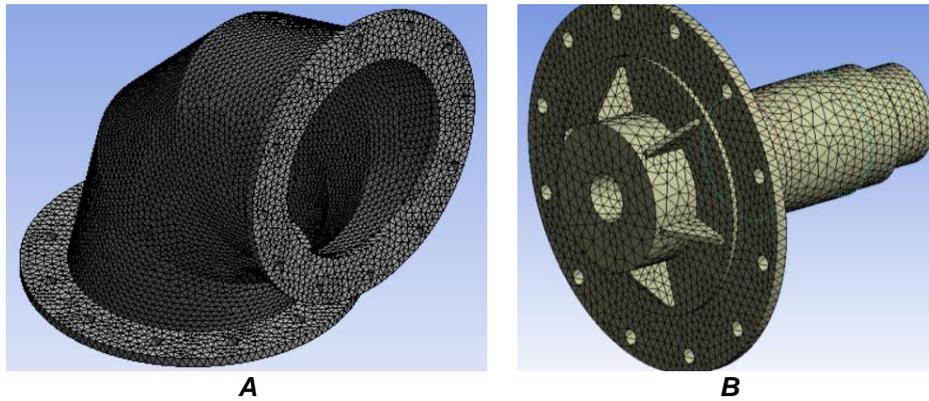


Figura 3.33. Mallado de elementos de góndola. A) Codo. B) Eje principal.

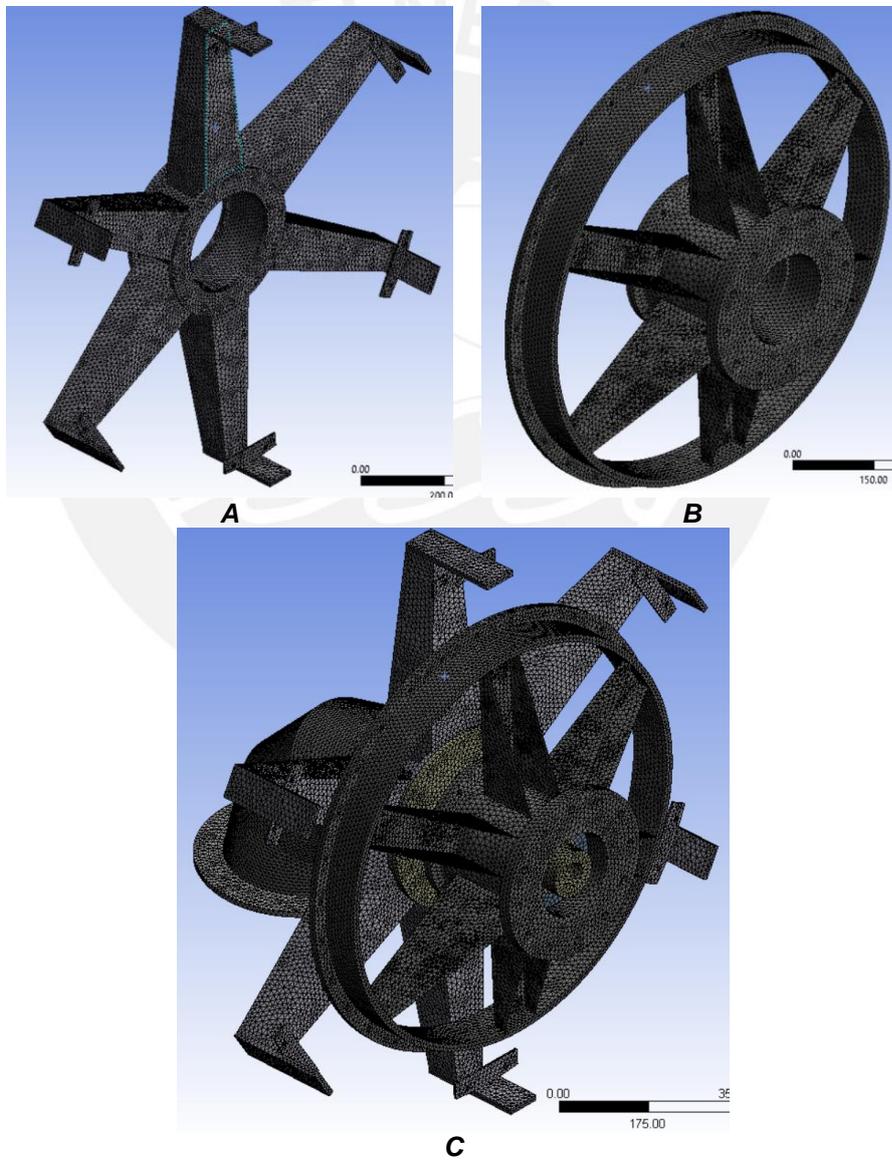


Figura 3.34. Mallado de elementos de góndola. A) Soporte estator. B) Rueda generador. C) Góndola completa.

Una vez mallado los elementos se procedió a indicar las condiciones de borde mostradas en la figura 3.35, las cuales se detallan a continuación:

- Apoyo fijo en la base del codo, movimiento y giro restringido en los ejes.
- Gravedad de la Tierra, 9.81 m/s^2 .
- Se considera que entre la conexión del eje principal y la rueda del generador existe movimiento rotativo.
- Se considera el momento y fuerza generados debido al giro de la hélice sobre el soporte del estator iguales a $3\,250 \text{ N.m}$ y $9\,506.4 \text{ N}$ respectivamente, ver Anexo 7.
- Se considera la masa de los componentes restantes igual a $1\,000 \text{ kg}$, ver Anexo 7.

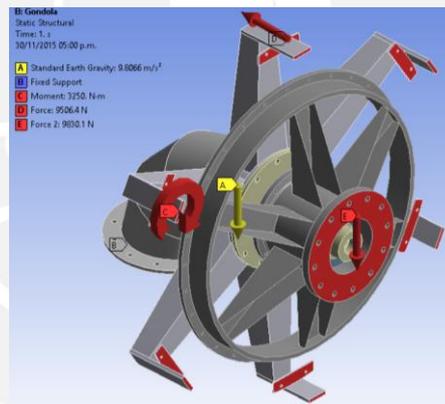


Figura 3.35. Condiciones de borde sobre la góndola.

3.4.1.1.2. Etapa de procesamiento

En esta etapa el software computacional se encarga de analizar y calcular los resultados necesitados en base a la solicitud.

3.4.1.1.3. Etapa de post – procesamiento

En esta etapa se obtuvo las gráficas y valores de los desplazamientos y esfuerzos que presentan los elementos de la góndola en toda su geometría. En la figura 3.36 se puede apreciar los desplazamientos que sufre la góndola en toda su longitud y la máxima ubicada en la rueda del generador es igual a 2.122 mm .

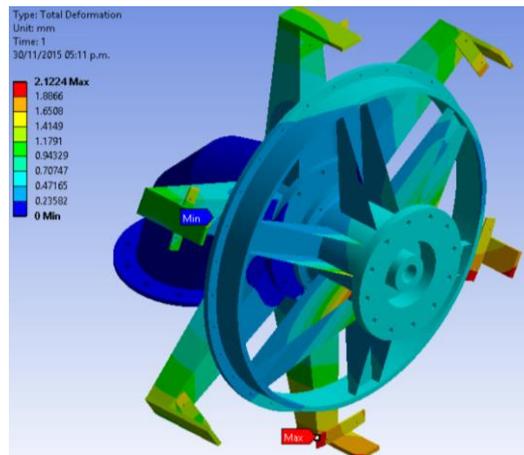


Figura 3.36. Desplazamiento (mm) del ensamble de la góndola.

En la figura 3.37 se puede apreciar la distribución de esfuerzos sobre los elementos de la góndola, además se aprecia que el esfuerzo máximo es igual a 229.02 MPa y se da cerca a uno de los nervios del soporte estator. En general; evaluando los esfuerzos sobre todos los elementos se puede apreciar que no son lo suficientemente altos como para que los elementos fallen.

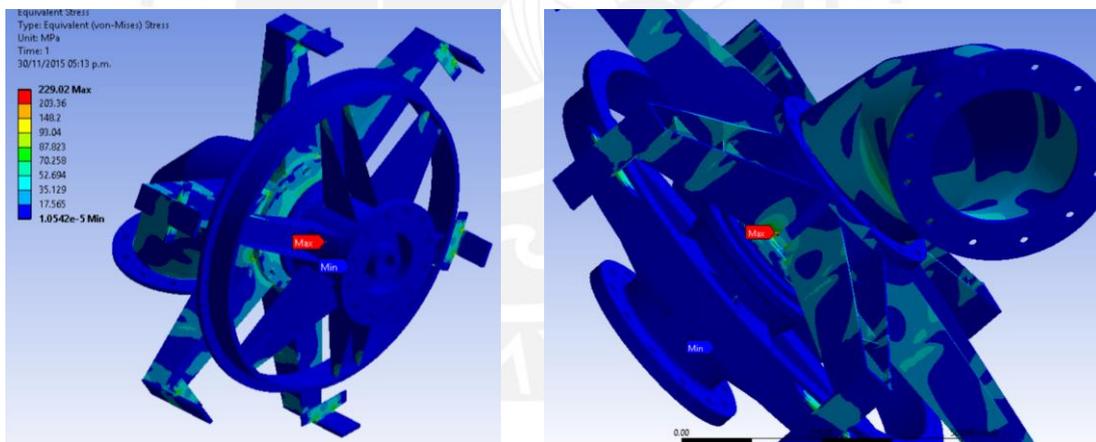


Figura 3.37. Esfuerzos (MPa) sobre la góndola.

3.4.2. Análisis del eje principal

En el presente análisis se busca estudiar el comportamiento del eje principal de la góndola mediante simulación numérica computacional.

3.4.2.1. Cálculo de reacciones, desplazamientos y esfuerzos

En el análisis se obtienen las reacciones, así como los esfuerzos y desplazamientos que sufre el eje principal de la góndola. En primer lugar, se realizó el modelo 3D

mostrado en la figura 3.38 con ayuda del software Autodesk Inventor 2016 para luego poder exportarlo al software ANSYS MECHANICAL.



Figura 3.38. Eje principal de la góndola.

3.4.2.1.1. Etapa de pre – procesamiento

En esta etapa, se define en primera instancia el modelo analizar, el cual está conformado por un solo elemento sólido como en el análisis analítico y en la figura 3.39 se muestra al eje exportado en el programa ANSYS.

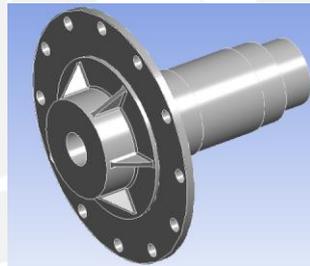


Figura 3.39. Eje principal de la góndola en ANSYS.

Una vez exportado el modelo del eje al programa ANSYS MECHANICAL se procedió a realizar el mallado de este, el cual cuenta con las siguientes características:

- Elementos Tetraédricos.
- N° de nodos y N° de elementos: 2 794 056 y 1 819 720 respectivamente.
- Tamaño de malla varía en el rango de $9.53 \times 10^{-2} \text{ mm} \leq x \leq 19.05 \text{ mm}$.
- Element Quality, Skewness y Othogonal Quality con valores mostrados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores de los parámetros de malla.

Parámetro	Valor
Element Quality	0.7832
Skewness	0.3205
Orthogonal quality	0.8216

En la figura 3.40 se presenta el mallado del eje principal.

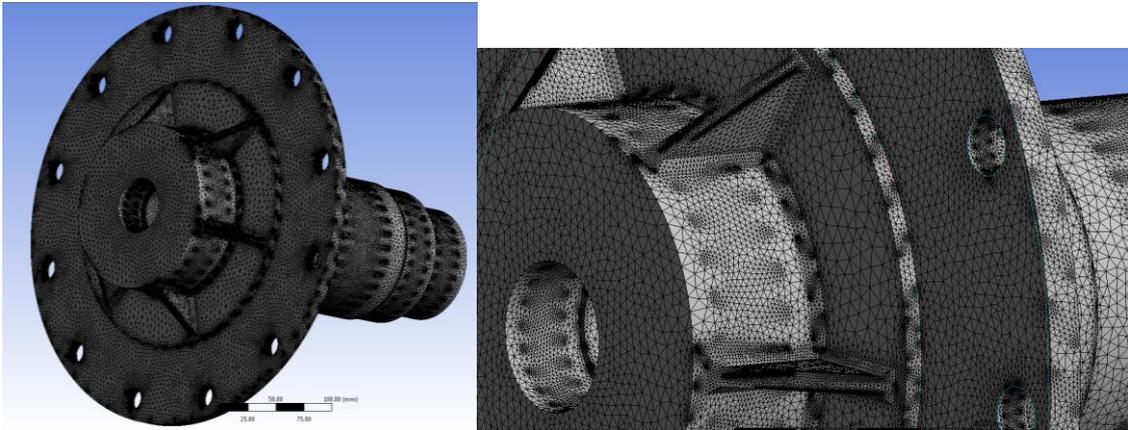


Figura 3.40. Mallado del eje principal.

Una vez realizado el mallado del elemento, se procede a indicar las condiciones de borde mostradas en la figura 3.41, las cuales son las siguientes:

- Apoyo fijo en la sección que será única con otra brida, movimiento y giro restringido en los ejes.
- Gravedad de la Tierra ,9.81 m/s².
- Masa del soporte estator, 66.4 kg, ver Anexo 7.
- Fuerza y Momento debido al giro de la hélice del aerogenerador, 9 506.4 N y 3 250 N.m respectivamente, ver Anexo 7.
- Masa de la rueda del generador, 55.5 kg, ver Anexo 7.

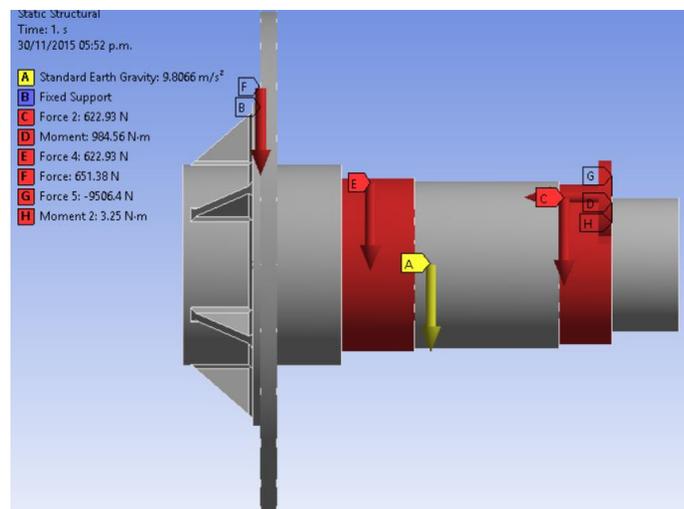


Figura 3.41. Eje principal de la góndola con condiciones de borde.

3.4.2.1.2. Etapa de procesamiento

En esta etapa el software computacional se encarga de analizar y calcular los resultados necesarios en base a la sollicitación.

3.4.2.1.3. Etapa de post – procesamiento

En esta etapa se obtuvo las gráficas y valores de las reacciones, los desplazamientos y esfuerzos que presenta el eje principal en su longitud. En la figura 3.42 se puede apreciar los desplazamientos que sufre el eje principal en toda su longitud y la máxima ubicada en la parte izquierda siendo igual a 0.0136 mm.

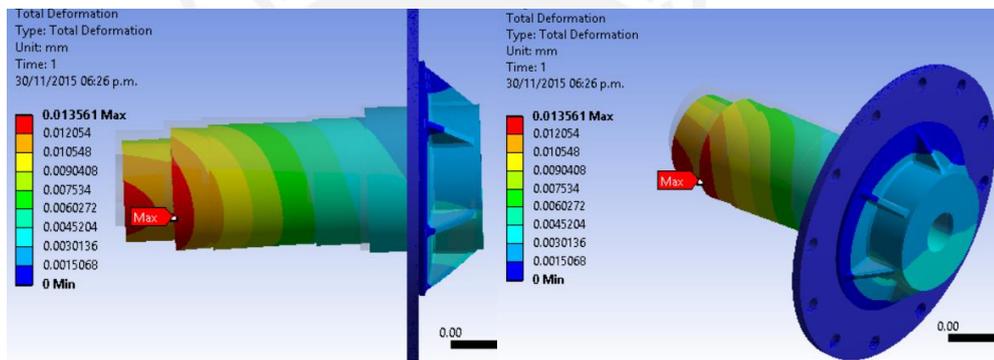


Figura 3.42. Desplazamientos (mm) en el eje principal de la góndola.

En la figura 3.43 se muestra la distribución de esfuerzos sobre el eje principal, además se aprecia que el esfuerzo máximo es igual a 28.341 MPa se da cerca a uno de los cambios de sección.

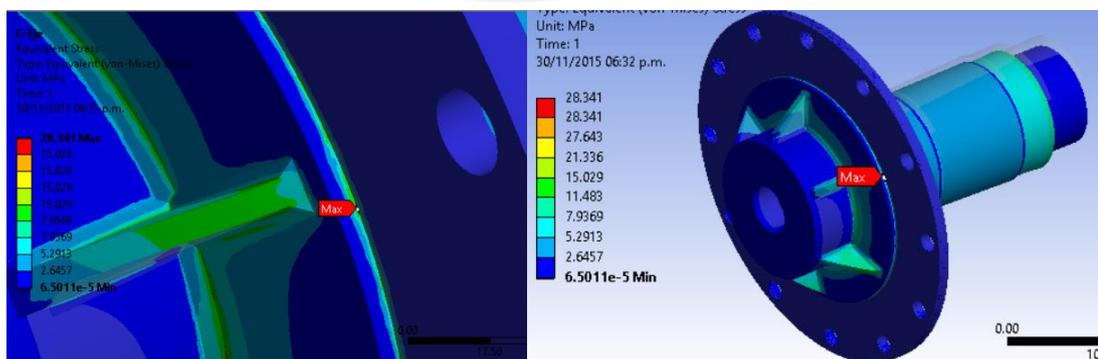


Figura 3.43. Esfuerzos (MPa) sobre el eje principal de la góndola.

En cuanto a las reacciones en la zona considerada como apoyo fijo se obtuvieron los siguientes valores mostrados en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Reacciones en zona considerada como apoyo fijo.

Carga	Magnitud	Unidad
Reacción en x	9 506.4	N
Reacción en y	2 336	N
Momento	340.45	N.m

3.4.3. Análisis del codo

En el presente análisis se busca estudiar el comportamiento del codo de la góndola mediante simulación numérica computacional.

3.4.3.1. Cálculo de desplazamientos y esfuerzos

Con el presente análisis se busca obtener las reacciones así como los esfuerzos y desplazamientos que sufre el codo de la góndola. En primer lugar se realizó el modelo 3D mostrado en la figura 3.44 con ayuda del software Autodesk Inventor 2016 para luego poder exportarlo al software ANSYS MECHANICAL.

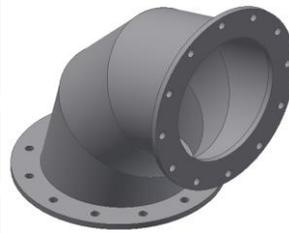


Figura 3.44. Codo de la góndola.

3.4.3.1.1. Etapa de pre – procesamiento

En esta etapa se define en primera instancia el modelo analizar, el cual está conformado por un solo elemento sólido como se puede apreciar en la figura 3.45.

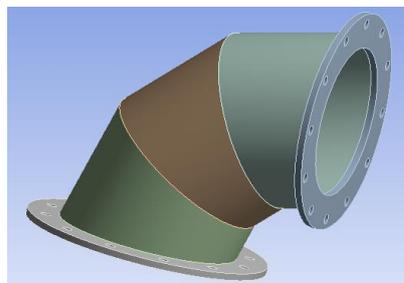


Figura 3.45. Codo de la góndola en ANSYS.

Una vez exportado el modelo de la torre al programa ANSYS MECHANICAL, se procedió a realizar el mallado de este, el cual cuenta con las siguientes características:

- Elementos Tetraédricos.
- N° de Nodos y N° de elementos: 2 461 530 y 489 399 respectivamente.
- Tamaño de malla varia en el rango de $0.453 \leq x \leq 90.60$ mm.
- Element Quality, Skewness y Orthogonal Quality con valores mostrados en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Valores de los parámetros de la calidad de malla.

Parámetro	Valor
Element Quality	0.8055
Skewness	0.1585
Orthogonal quality	0.9565

En la figura 3.46 se presenta el mallado del codo.

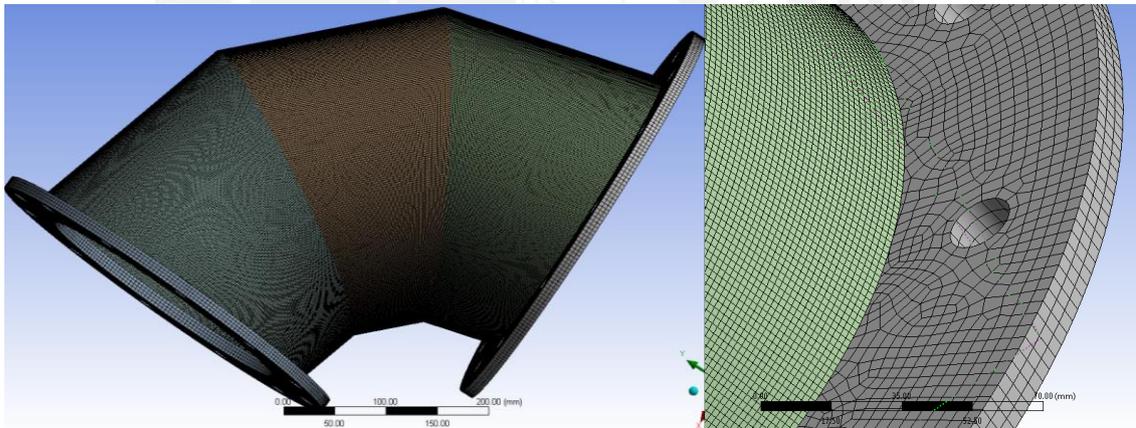


Figura 3.46. Codo de la góndola con mallado.

Una vez realizado el mallado del elemento se procedió a indicar las condiciones de borde mostradas en la figura 3.47, las cuales son las siguientes:

- a) Apoyo fijo en la base, movimiento y giro restringido en los ejes.
- b) Gravedad de la Tierra, 9.81 m/s^2 .
- c) Se considera en la parte superior del codo actúan 2 fuerzas, una debido al empuje aerodinámico y otra fuerza que representa el peso de los componentes de la góndola y hélice, $9\,506.4 \text{ N}$ y $12\,263 \text{ N}$, ver Anexo 7.

- d) Se considera el momento debido al giro de la hélice, 3 250 N.m, ver Anexo 7.
- e) Se considera el momento debido al traslado del peso de los componentes, 187.5 kN.m.

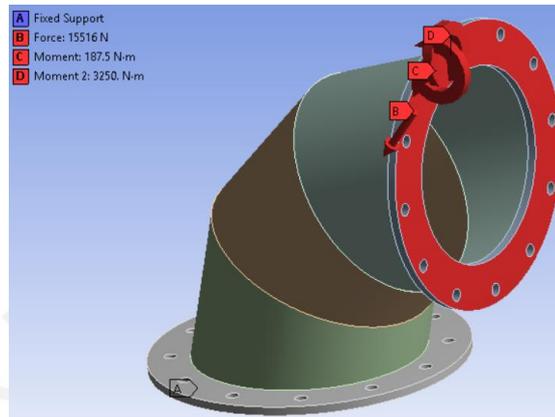


Figura 3.47. Codo de la góndola con condiciones de borde.

3.4.3.1.2. Etapa de procesamiento

En esta etapa el software computacional se encarga de analizar y calcular los resultados necesitados en base a la sollicitación.

3.4.3.1.3. Etapa de post – procesamiento

En esta etapa se obtuvo las gráficas y valores de las reacciones, los desplazamientos y esfuerzos que presenta el codo. En la figura 3.48, se puede apreciar las desplazamientos que sufre el codo en toda su geometría y la máxima ubicada en la parte superior siendo igual a 0.1239 mm.

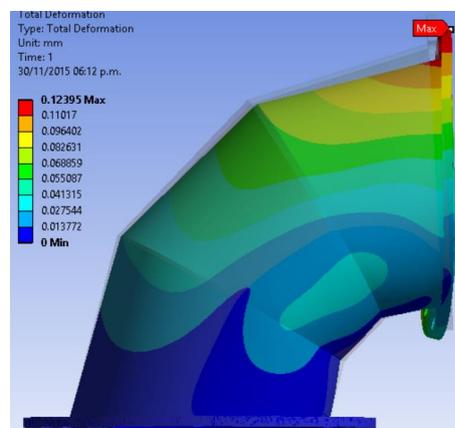


Figura 3.48: Desplazamiento (mm) del codo de la góndola.

En la figura 3.49, se refleja la distribución de esfuerzos sobre el codo, además se aprecia que el esfuerzo máximo es igual a 51.946 MPa se da cerca a uno de los cambios de sección.

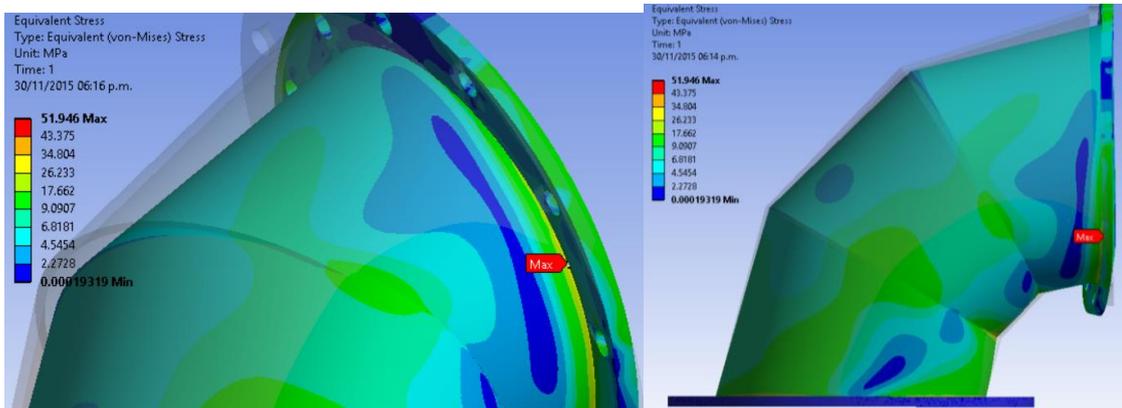


Figura 3.49. Esfuerzos (MPa) sobre el codo de la góndola.

En cuanto a las reacciones en la zona considerada como apoyo fijo se obtuvieron los siguientes valores mostrados en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Reacciones en zona considerada como apoyo fijo.

Carga	Magnitud	Unidad
Reacción en x	9 506.4	N
Reacción en y	12 262	N
Momento	841.83	N.m

CAPÍTULO 4

ESTUDIO ANALÍTICO ESTRUCTURAL Y MODAL DE LA TORRE Y GÓNDOLA

4.1. Introducción

En el presente capítulo se detallará el procedimiento seguido para realizar el estudio analítico de los elementos que conforman la torre y la góndola del aerogenerador. Con respecto a la torre, en primer lugar se procedió con la identificación y cálculo de las cargas y esfuerzos actuantes para así posteriormente realizar un análisis de estabilidad y cálculo de frecuencias naturales; de igual forma que en la torre se identifican y calculan las cargas y esfuerzos sobre los elementos que conforman la góndola. Luego con todos los datos obtenidos se realizó una comparación de resultados con los hallados en el análisis mediante simulación numérica en el capítulo 3.

4.2. Estudio de la torre

Para la verificación del diseño de la torre se analizó en dos posiciones principales, en funcionamiento y en izaje, las cuales son la base para las comparaciones de resultados con los posteriores cálculos mediante simulación numérica.

4.2.1. En posición de funcionamiento

Para el análisis en funcionamiento se considera a la torre en posición vertical y empotrada en la base además ésta es compuesta por cuatro elementos de sección

variable en toda su longitud y se identifican como base, segmento base, segmento intermedio y segmento superior. En la figura 4.1 se puede apreciar las dimensiones de dichos elementos que conforman la torre del aerogenerador. Cada uno de estos se caracteriza por tener la sección variable a través de su longitud.

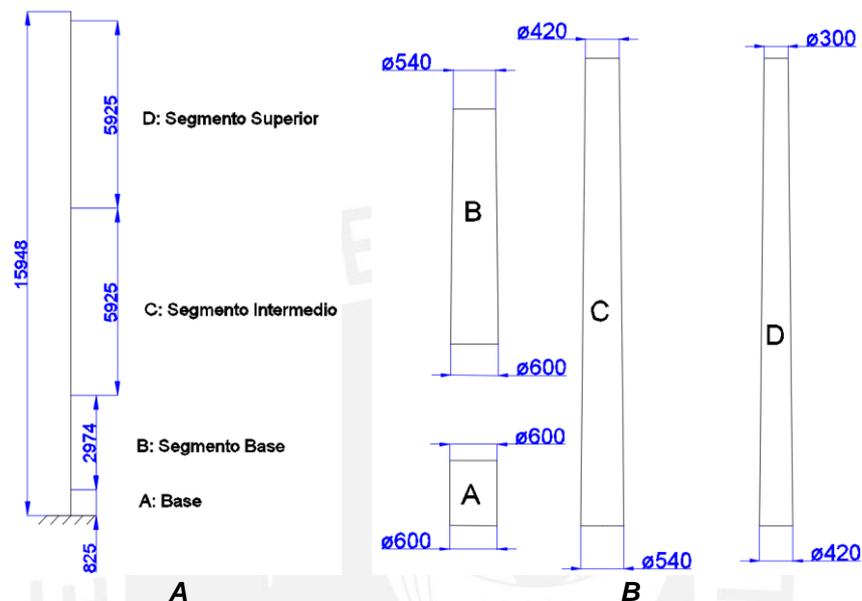


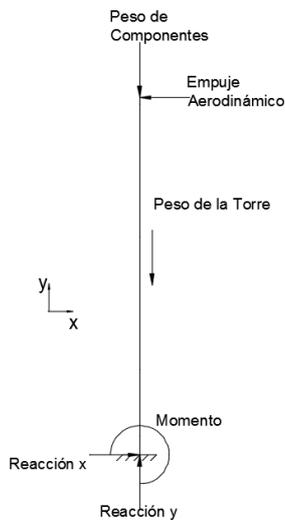
Figura 4.1. Dimensiones de los elementos que conforman la Torre. A) Longitudes de cada elemento. B) Secciones de cada elemento.

4.2.1.1. Cálculo de cargas actuantes

En primer lugar se identifica las cargas a las que está sometida la torre, las cuales son las siguientes:

- Fuerza debido al peso de los componentes que conforman la góndola y la hélice.
- Fuerza debido a la rotación de la hélice del aerogenerador.
- El peso total de los componentes de la torre.

La magnitud de las cargas se detalla en el Anexo 7; luego de identificadas estas cargas se realizó el diagrama de cuerpo libre (D.C.L.) de la torre, figura 4.2.



- F: Fuerza de Empuje aerodinámico debido al giro en la hélice.
- P: Peso de Componentes (góndola y hélice).
- W: Peso propio de los componentes que conforman la torre.
- R_x , R_y , M: Reacciones producidas en la base empotrada de la torre.

Figura 4.2. Diagrama de cuerpo libre de la torre.

Las propiedades del material de los elementos que conforman la torre son las mostradas en la tabla A7.2 del Anexo 7. Con toda la información antes mencionada se procede al cálculo de las reacciones en el empotramiento con ayuda de las ecuaciones del equilibrio estático de la torre:

$$\sum F_x = 0 : R_x - F = 0 ,$$

$$R_x = 9\,506.4 \text{ N} ,$$

$$\sum F_y = 0 : R_y - P - W = 0 ,$$

$$R_y = 21\,532.95 \text{ N} ,$$

$$\sum M = 0 : M + F \cdot L = 0 ,$$

$$M = 151\,607.8 \text{ N.m} .$$

Luego de calculadas las reacciones, se procedió a graficar los diagramas de fuerzas internas en toda la longitud de la torre, ver figura 4.3.

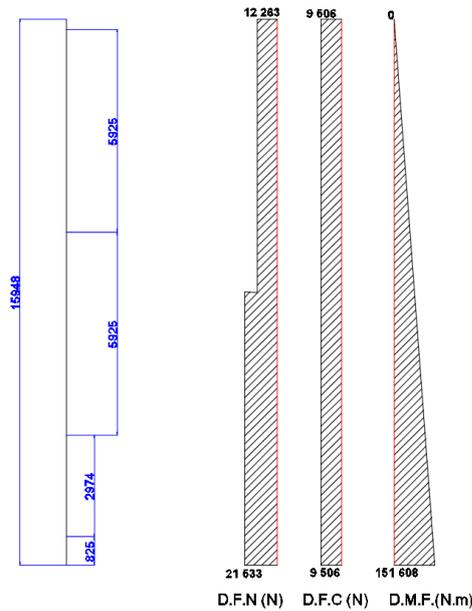
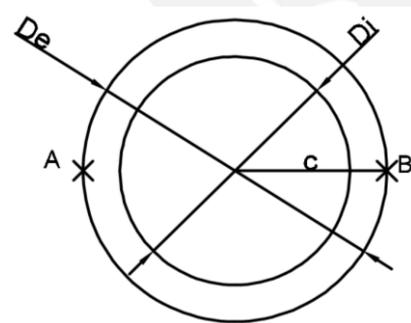


Figura 4.3. Diagrama de cuerpo libre de la torre.

4.2.1.2. Cálculo de esfuerzos

En base a los diagrama de fuerzas internas mostrados en la figura 4.3 se puede identificar que la sección crítica es la ubicada en la base empotrada de la torre por lo que se procede a analizar la sección en mención. En la Figura 4.4 se puede apreciar las dimensiones de la sección a analizar.



- $D_e = 600 \text{ mm}$
- $D_i = 590.48 \text{ mm}$
- $e = 4.76 \text{ mm}$
- $A = \pi \cdot \frac{D_e^2 - D_i^2}{4} = 11\,333.37 \text{ mm}^2$
- $I = \pi \cdot \frac{D_e^4 - D_i^4}{64} = 0.000394249 \text{ m}^4$
- $c = 300 \text{ mm}$

Figura 4.4. Dimensiones de sección empotrada en la base.

Luego de identificar las características de la sección se procedió con el cálculo de los respectivos esfuerzos con ayuda de las ecuaciones (1.1) y (1.2).

- Debido a la fuerza axial:

$$\sigma_{n1} = \frac{21\,532.95}{\frac{\pi}{4} \cdot (600^2 - 590.48^2)} = \frac{21\,532.95}{0.00890121} = 2.42 \text{ MPa.}$$

- Debido al momento flector:

$$\sigma_{m1} = 151\,607.8 \cdot \frac{0.3}{0.000394249} = 115.36 \text{ MPa.}$$

Una vez calculado los esfuerzos normales se calculan en los puntos A y B (ver figura 4.4).

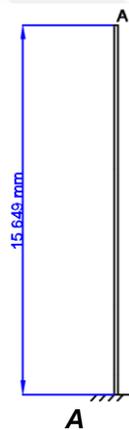
- Punto A sometido a tracción: - Punto B sometido a compresión:

$$\sigma_T = \sigma_{m1} - \sigma_{n1} = 112.94 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_C = \sigma_{m1} + \sigma_{n1} = 117.78 \text{ MPa.}$$

4.2.1.3. Análisis de estabilidad

Para el análisis por pandeo se aplicó la teoría de Euler [5], para lo cual se realizó el cálculo de la fuerza crítica de pandeo con lo cual se analizó si sistema fallaría. En primer lugar, se consideró a la torre como un solo elemento de longitud y características promedio cuyo detalle se muestra en la figura 4.5; además se consideró al tipo de apoyo del sistema como un empotrado – libre mostrado en la figura 4.6.



- $D_e = 450 \text{ mm}$
- $D_i = 440.48 \text{ mm}$
- $e = 4.76 \text{ mm}$
- $A = \pi \cdot \frac{r^2}{4} = 6.658 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$
- $I = \pi \cdot \frac{r^4}{4} = 1.65 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

Figura 4.5. Torre para análisis por pandeo. A) Representación de torre como una barra empotrada en la base. B) Características promedio de la torre.

Con las características identificadas se procedió con el cálculo de las variables necesarias para el análisis según la metodología de Euler. En primer lugar se

calcularon los parámetros necesarios como la longitud de pandeo según el sistema seleccionado (ver figura 4.6), el radio de giro y la esbeltez.

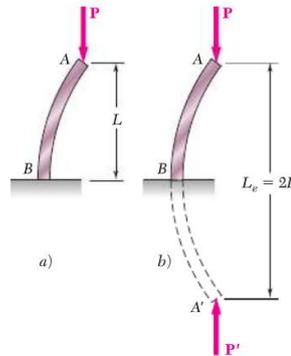


Figura 4.6. Longitud equivalente de pandeo del sistema empotrado – Libre [6].

Se obtiene lo siguiente:

- $L_p = 2 \cdot 15\,649 = 31.298,$
- $i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 0.211\text{ m},$
- $\lambda = \frac{L_p}{i} = 148.72.$

Luego de calculada la esbeltez se debe de corroborar que esta cumpla con la condición establecida por Euler para que así se pueda trabajar en el rango establecido según la metodología aplicada.

$$\lambda_{FE} = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_F}}, \tag{4.1}$$

$$\lambda > \lambda_{FE} = 91.05.$$

Una vez corroborada la condición se procedió a realizar el cálculo de la fuerza crítica de pandeo con la ecuación (4.2).

$$F_p = 8.342 \cdot 10^5\text{ N}.$$

- $F_{actuante} = 21\,950\text{ N}.$
- $\text{Incremento} = \frac{F_p}{F_{actuante}} = 38.004 \approx 38.$

Finalmente se puede identificar que la fuerza actuante debería de incrementar en 38 veces su magnitud aproximadamente para que la torre logre alcanzar una fuerza tal que provoque un fallo por pandeo.

4.2.1.4. Cálculo de frecuencias naturales

Para el correspondiente análisis y cálculo de la frecuencia natural de la torre se procede a idealizarlo como un sistema de un grado de libertad donde basta con una coordenada para especificar la posición de la masa en cualquier momento, ver figura 4.7.

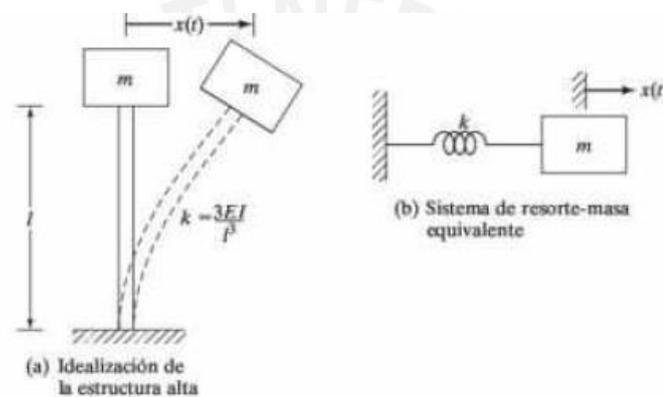


Figura 4.7. Modelado de una estructura alta como un sistema de 1 grado de libertad [7].

Una vez idealizado el sistema se procede a calcular el desplazamiento en el punto A mostrado en la figura 4.8 y con ayuda del teorema de Castigliano mediante la ecuación (4.3).

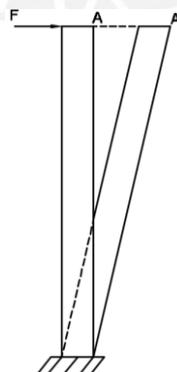


Figura 4.8. Desplazamiento del punto A de la torre.

$$x = \frac{dU}{dP} = \int_0^L \frac{M}{EI} \cdot \frac{dM}{dP} \cdot dx \tag{4.3}$$

Las características del sistema analizado son las mostradas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de la torre para el cálculo de frecuencias.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Longitud (L)	15 649	mm
Masa góndola (m_g)	1 250	kg
Masa torre (m_{torr})	945	kg
Módulo de elasticidad del acero (E)	2.1×10^5	MPa

Una vez defino el sistema se procede a calcular el momento en el punto A con las ecuaciones de equilibrio estático del sistema:

$$\sum M_A = 0 : M_y = F \cdot y ,$$

$$\frac{dM_y}{dF} = y .$$

Con la ecuación de momento definida en función a la longitud de la torre se procede mediante la ecuación (3.3) a calcular el desplazamiento en el punto superior A:

$$\delta_A = \frac{dU}{dF} = \int_0^L \frac{M_y}{EI} \cdot \left(\frac{dM_y}{dF} \right) \cdot dy ,$$

$$\delta_A = \frac{dU}{dF} = \int_0^L F \cdot y \cdot y \cdot \frac{dy}{E \cdot I} = 226.109 \text{ mm} .$$

Luego con el dato del desplazamiento se procede al cálculo de la masa equivalente y la rigidez del resorte según las ecuaciones (4.4) y (4.5) en base al sistema planteado.

$$m_{\text{eq}} = m_g + \frac{1}{3} \cdot m_{\text{torr}} , \quad (4.4)$$

$$m_{\text{eq}} = 1\,565 \text{ kg} ,$$

$$k = \frac{F}{\delta_A} , \quad (4.5)$$

$$k = 4.204 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}} .$$

Finalmente se realizó el cálculo de la frecuencia natural del sistema obteniéndose:

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m_{eq}}} = 5.183 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0.825 \text{ Hz.}$$

4.2.2. En posición de izaje

Para el análisis de la torre en el izaje se considera está en posición horizontal y la base se considera como un apoyo rígido. En la siguiente figura 4.9 se muestra la posición en la cual se analizará la torre (horizontal) al momento de su instalación, se debe tomar en cuenta que la base se considerara como un sólido rígido y no se tomará en cuenta en el análisis de esfuerzos en ésta.

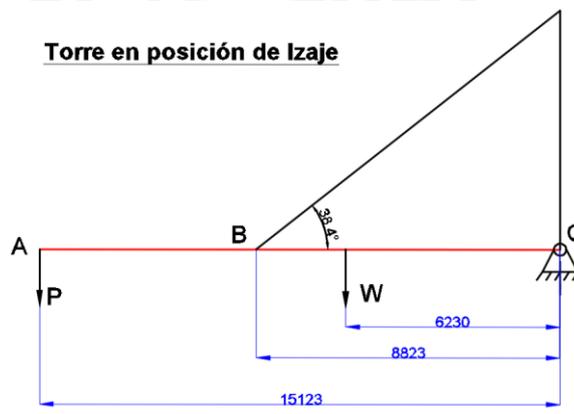


Figura 4.9. Posición de la torre en el izaje.

4.2.2.1. Cálculo de cargas actuantes

En primer lugar se identificó las cargas a las que se encuentra sometida la torre, las cuales son las siguientes:

W = Peso de torre, 9 270 N.

P = Peso de hélice y góndola, 12 263 N.

F = Fuerza en el tirante, N.

Luego se realizó el diagrama de cuerpo libre (D.C.L.) de la torre, figura 4.10.

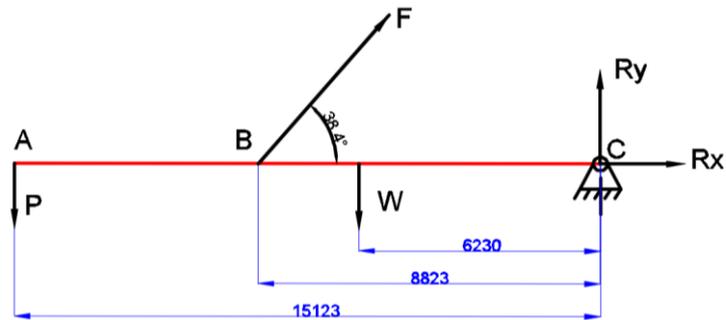


Figura 4.10. Diagrama de cuerpo libre de la torre en izaje.

Con la información antes mostrada se realizó el cálculo de la fuerza y las reacciones en el punto C con las ecuaciones de equilibrio estático de la torre:

$$\sum F_x = 0 : R_x + F \cdot \cos(38.4^\circ) = 0 ,$$

$$R_x = -34\,746.14 \text{ N} ,$$

$$\sum F_y = 0 : R_y + F \cdot \sin(38.4^\circ) = W + P ,$$

$$R_y = -6\,006.01 \text{ N} ,$$

$$\sum M_c = 0 : W \cdot 6\,230 + P \cdot 15\,123 = F \cdot \sin(38.4^\circ) \cdot 8\,823 ,$$

$$F = 44\,336.39 \text{ N} .$$

Una vez halladas nuestras incógnitas se realizan los diagramas de fuerzas internas del sistema mostrados en la figura 4.11.

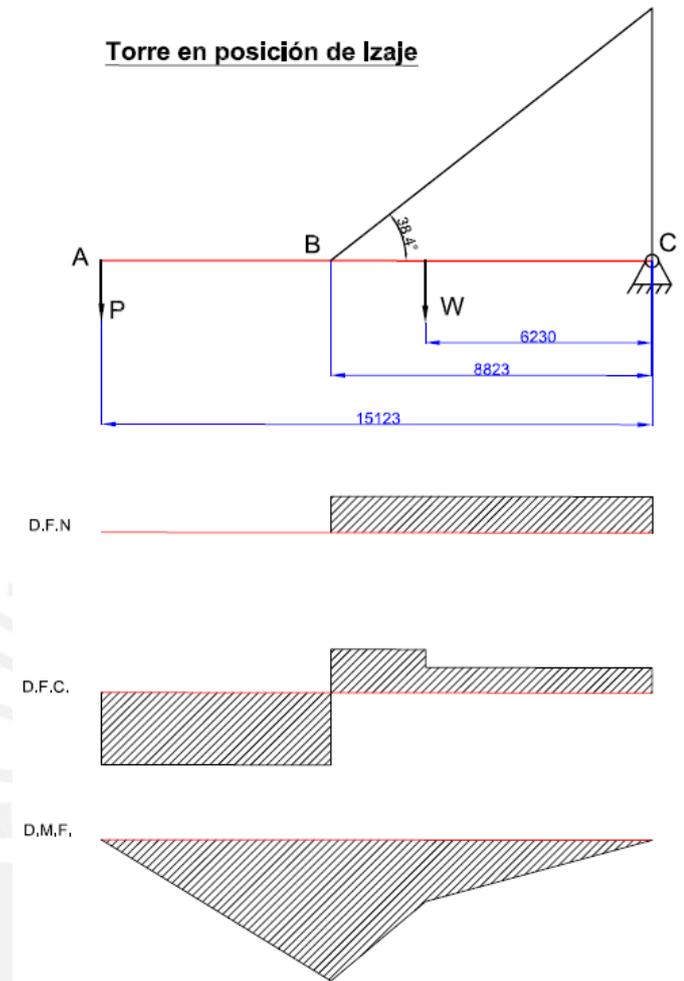
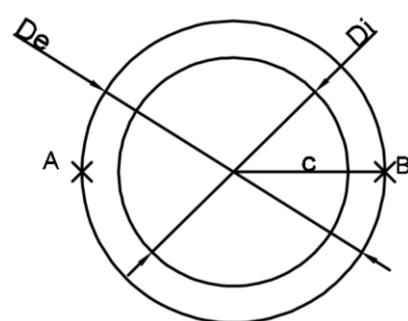


Figura 4.11. Diagramas de fuerzas internas de la torre en el izaje.

4.2.2.2. Cálculo de esfuerzos

En base a los diagramas de fuerzas internas graficados en la figura 4.11 se identifica que la sección más cargada se ubica en la zona B. En la figura 4.12 se presentan las características de la sección ubicada en la zona B.



- $De = 420 \text{ mm}$
- $e = 4.76 \text{ mm}$
- $A = \pi \cdot \frac{De^2 - Di^2}{4} = 6\,209.49 \text{ mm}^2$
- $I = \pi \cdot \frac{De^4 - Di^4}{64} = 133\,850\,947.78 \text{ mm}^4$
- $c = 210 \text{ mm}$

Figura 4.12: Dimensiones de sección base a analizar.

Luego de identificar las características de la sección, se procedió con el cálculo de los respectivos esfuerzos con ayuda de las ecuaciones (1.1) y (1.2).

- Debido a la fuerza axial:

$$\sigma_{Na} = \frac{34\,746.14}{\frac{\pi}{4} \cdot (420^2 - 410.48^2)} = 5.59 \text{ MPa.}$$

- Debido al momento flector:

$$\sigma_{Nm} = 77\,256.9 \cdot \frac{0.210}{133\,850\,947.78 \cdot 10^{-12}} = 121.05 \text{ MPa.}$$

Una vez calculado los esfuerzos normales se calculan en los puntos A y B mostrados en la figura 4.12.

- Punto A sometido a tracción: $\sigma_{NT} = \sigma_{Nm} - \sigma_{Na} = 115.46 \text{ MPa.}$
- Punto B sometido a compresión: $\sigma_C = \sigma_{Nm} + \sigma_{Na} = 126.64 \text{ MPa.}$

4.3. Estudio de la góndola

Para el estudio de la góndola se optó por realizar el análisis del eje principal, uno de los componentes más importantes que la conforman, para ello se realizó el cálculo de las cargas actuantes y los esfuerzos en las secciones críticas. Para luego realizar las comparaciones de resultados con los posteriores cálculos mediante simulación numérica.

4.3.1 Estudio del eje principal

Para el estudio del eje principal del aerogenerador en primer lugar se identificó la geometría que posee y cómo es que se debe realizar el análisis. En la figura 4.13 se puede apreciar por un lado la forma del eje principal que fueron proporcionados por la empresa WAIRA y en la otra imagen la simplificación, empotrado en la esquina izquierda, que se realizó para el análisis de este eje.

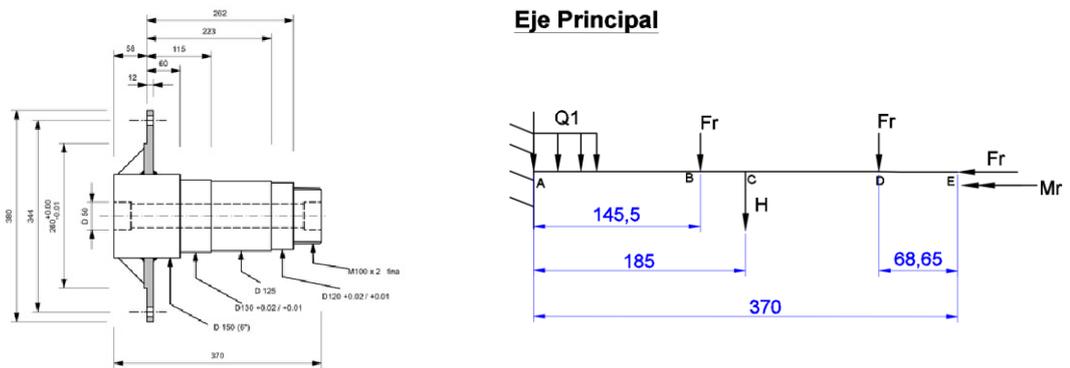


Figura 4.13. Plano y sistema simplificado para estudio del eje principal.

4.3.1.1. Cálculo de cargas actuantes

En primer lugar se identificó las cargas y reacciones en el eje según lo mostrado en la figura 4.14, las cuales se detallan en la tabla A7.3 del Anexo 7.

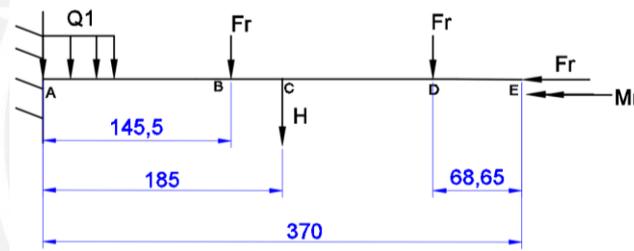


Figura 4.14. Sistema representativo del eje principal con distribución de cargas actuantes.

Una vez identificadas las cargas y reacciones se realizó el diagrama de cuerpo libre (D.C.L.) del eje mostrado en la figura 4.15.

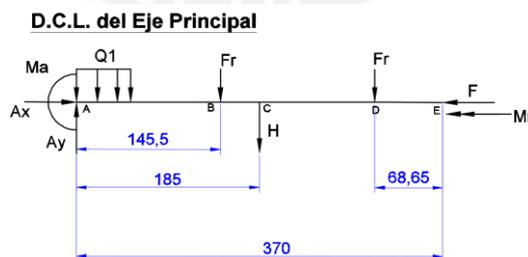


Figura 4.15. Diagrama de cuerpo libre del eje principal.

Con toda esta información se procede con el cálculo de las reacciones y momento en el empotramiento “A” con las ecuaciones de equilibrio estático:

$$\sum F_x = 0 : A_x - F = 0 ,$$

$$A_x = 9\,506.4 \text{ N},$$

$$\sum F_y = 0 : A_y = 9.81 \cdot (P + F_r + Q_1),$$

$$A_y = 2\,192 \text{ N},$$

$$\sum M_A = 0 : M_a + 0.1455 \cdot F_r + 0.185 \cdot P + 0.3005 \cdot F_r + 0.0275 \cdot Q_1 = 0,$$

$$M_a = -350.188 \text{ N.m}.$$

Una vez halladas nuestras incógnitas se realizan los diagramas de fuerzas internas del eje mostrado en la figura 4.16.

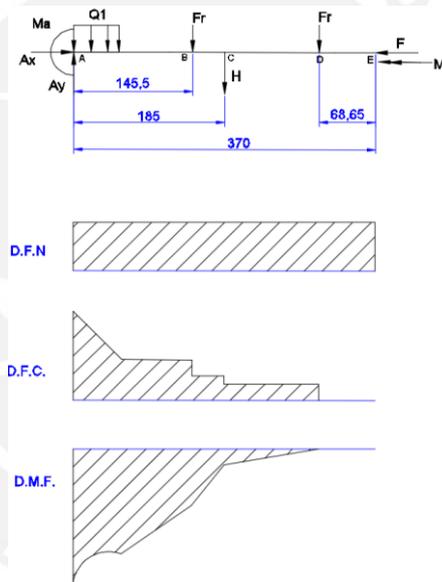
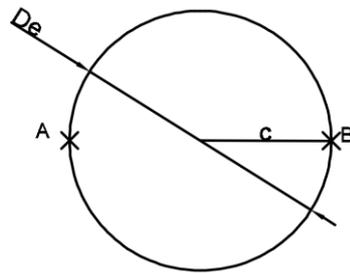


Figura 4.16: Diagrama de fuerzas internas en el eje principal.

4.3.1.2. Cálculo de esfuerzos

En base a los diagramas de fuerzas internas graficados en la figura 4.16 se identifica que la sección más cargada se ubica en la sección A. En la figura 4.17 se presentan las características de la sección ubicada en la sección A.



- $De = 150 \text{ mm}$
- $A = \pi \cdot \frac{De^2}{4} = 0.018 \text{ m}^2$
- $I = \pi \cdot \frac{De^4}{64} = 2.485 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$
- $I_o = \pi \cdot \frac{De^4}{32} = 4.97 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$
- $c = 75 \text{ mm}$

Figura 4.17: Dimensiones de sección base a analizar.

Luego de identificar las características de la sección se procedió con el cálculo de los respectivos esfuerzos con ayuda de las ecuaciones (1.1), (1.2) y (1.4).

- Debido a la fuerza axial:

$$\sigma_{Na} = \frac{9\,506.4 \text{ N}}{0.018 \text{ m}^2} = 0.528 \text{ MPa.}$$

- Debido al momento flector:

$$\sigma_{Nm} = 350.188 \text{ N.m} \cdot \frac{0.075 \text{ m}}{2.485 \cdot 10^7 \text{ mm}^4} = 1.057 \text{ MPa.}$$

Se toma en cuenta lo siguiente:

$$\sigma = \sigma_{Na} + \sigma_{Nm} = 1.585 \text{ MPa.}$$

- Debido al momento Torsor:

$$\sigma_T = 3\,250 \text{ N.m} \cdot \frac{0.075 \text{ m}}{4.97 \cdot 10^7 \text{ mm}^4} = 4.904 \text{ MPa.}$$

Una vez calculados estos esfuerzos se procede a realizar el cálculo del esfuerzo equivalente por la Teoría de máxima energía de distorsión:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = 8.641 \text{ MPa.}$$

4.4. Comparación de resultados

A continuación se detallaran las comparaciones realizadas entre los datos obtenidos de desplazamientos y esfuerzos mediante los cálculos analíticos y mediante la simulación numérica computacional de la torre y góndola, además de los estudios de estabilidad y análisis modal en la torre.

4.4.1. Comparación de resultados de la torre en posición de funcionamiento

Luego de los análisis, se muestra las comparaciones de los resultados obtenidos en la base de la torre mediante cálculos analíticos y mediante simulación numérica. En la tabla 4.2, se detalla la comparación de los resultados obtenidos de reacciones y momento en la base de la torre y la variación presente entre estos casos.

Tabla 4.2. Comparación de reacciones en la base hallados de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica.

-	Simulación	Analítico	Variación (%)
Rx (N)	9 506.4	9 506.4	0.00%
Ry (N)	23 352	21 532.95	8.45%
Momento (N.mm)	148 640	151 604.76	1.96%

En la tabla 4.3, se muestra la comparación de desplazamiento y esfuerzo entre el análisis analítico y mediante la simulación con su respectiva variación.

Tabla 4.3. Comparación de desplazamiento y esfuerzo obtenidos de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica.

-	Simulación	Analítico	Variación (%)
Desplazamiento (mm)	223.4	226.109	1.19%
Esfuerzo (MPa)	120.17	117.78	2.02%

Se puede observar que los diferentes valores de desplazamiento, reacciones, esfuerzos son casi similares al comparar los obtenidos mediante los métodos analíticos y mediante simulación numérica, por lo cual se puede decir que el modelo usado en la simulación es adecuado obteniendo un factor de seguridad de 1.3 en la torre.

4.4.1.1. Comparación de resultados de la torre por análisis de estabilidad

Los resultados del análisis por pandeo mediante cálculos analíticos y mediante simulación numérica, son presentados en la tabla 4.4; se puede apreciar una elevada variación, que se debe al asumir las condiciones de apoyo para la longitud equivalente en el cálculo por el método de Euler en la parte analítica. Además de ello se aprecia que el factor crítico de pandeo es igual a 31.

Tabla 4.4. Comparación de resultado de análisis por pandeo.

-	Simulación	Analítico	Variación (%)
Incremento de carga	31	38	18.42 %

4.4.1.2. Comparación de resultados de la torre por análisis modal

En la tabla 4.5, se muestra los valores de las frecuencias naturales del primer modo de vibración de la torre obtenidos con los cálculos analíticos y mediante simulación numérica observándose una variación baja entre ambos métodos.

Tabla 4.5. Comparación de frecuencias naturales obtenidas de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica.

-	Simulación	Analítico	Variación (%)
Frecuencia Natural (Hz)	0.8624	0.825	4.53%

4.4.2. Comparación de resultados de la torre en posición de izaje

En la tabla 4.6, se realiza la respectiva comparación de la fuerza aplicada en el tirante que se encarga de izar la torre, el esfuerzo en la zona crítica y la reacción en x con respecto al giro entre la base y el segmento base obtenidos en la simulación numérica y el cálculo analítico observándose que las variaciones porcentuales son bajas.

Tabla 4.6: Comparación de reacciones y esfuerzo obtenidos de forma analítica con los valores obtenidos mediante simulación numérica en el Izaje.

-	Simulación	Analítico	Variación (%)
Fuerza el tirante (N)	42 297	44 336.39	4.59%
Esfuerzo (MPa)	129.83	126.64	2.52%
Reacción en x (N)	33 883	34 746.13	2.48%

4.4.3. Comparación de resultados del eje principal

En la tabla 4.7, se muestra la comparación de esfuerzos obtenidos mediante los cálculos analíticos y mediante simulación numérica así como la variación obtenida al comparar ambas. Se puede observar que en la zona analizada esta variación es baja. Obteniendo un factor de seguridad igual a 8.8.

Tabla 4.7: Comparación de resultados en la zona crítica del eje principal.

-	Simulación	Analítico	Variación (%)
Reacción en x (N)	9 506.4	9 506.4	0%
Reacción en y (N)	2 336	2 192	6.57%
Momento (N.m)	340.45	350.188	2.78%
Esfuerzo (MPa)	8.5891	8.641	0.60%

CONCLUSIONES

El diseño propuesto por la empresa WAIRA es adecuado. Los cálculos realizados permiten confirmar que los elementos estructurales del aerogenerador no fallarán por resistencia, con un factor de seguridad mínimo de 1.2 en la góndola. Tampoco habrá pérdida de estabilidad en la torre y no ocurrirá el fenómeno de resonancia para las condiciones nominales de trabajo o cercanos a éstas.

Para las condiciones nominales de trabajo, velocidad de viento igual a 10 m/s y velocidad rotacional de 120 rpm, se obtiene el campo de presiones mediante el análisis aerodinámico de la hélice obteniendo valores promedio de 5 kPa. Este mismo campo fue impuesto como carga en un posterior análisis estructural de la hélice donde se determina que el desplazamiento máximo alcanzado es de 64.343 mm presente en las puntas de las palas; mientras que el esfuerzo máximo de von Mises es igual a 207.02 MPa y se ubica en la unión entre palas y domo obteniéndose un factor de seguridad de la hélice igual a 1.3 en la hélice.

Las potencias obtenidas mediante simulación numérica computacional, método analítico y de diseño son iguales a 30.3 kW, 19.4 kW y 20 kW respectivamente para el caso nominal. Al comparar el valor de potencia de los cálculos analíticos con respecto al valor obtenido por simulación numérica computacional se parecía una diferencia del 36%. Al tomarse en cuenta que las potencias generadas son afectadas por las pérdidas mecánicas y eléctricas producidas en el sistema, se debe considerar que la turbina posee una eficiencia igual a 85%. Con esta eficiencia las nuevas potencias calculadas mediante simulación numérica computacional y mediante métodos analíticos son iguales a 25.8 kW y 16.5 kW respectivamente. Al contrastar estos valores con el valor de diseño se determina que la diferencia es de 21.2% por encima del valor de diseño en el caso de la simulación numérica computacional; mientras que en caso analítico se aprecia que es 21.4% por debajo de la potencia de diseño, lo cual permite concluir que el valor de potencia por simulación numérica es más coherente.

El análisis estático estructural de la torre mediante simulación numérica computacional permitió obtener resultados de desplazamientos y esfuerzos. El desplazamiento máximo ocurre en el punto más alto de la torre y alcanza un valor de 348.96mm,

mientras que el esfuerzos resultante máximo de von Mises se produce en la base de la torre, con un valor de 195.83. Por tanto, el factor de seguridad de la torre es igual a 1.3. Los resultados estructurales se pudieron verificar mediante cálculos analíticos para el caso de carga de trabajo, con una diferencia de 1.19% en los desplazamientos y 2.02% en los esfuerzos.

En base a los resultados del análisis estructural de la torre, bajo diferentes condiciones de carga según la norma LRFD, se puede concluir que las cargas más influyentes son la carga de viento sobre la torre y la carga de sismo. Estas incrementan en aproximadamente 80.2% y 34.25% las magnitudes de los esfuerzos y desplazamientos respectivamente.

A partir de los estudios de simulación de la torre se obtuvo un factor crítico de pandeo igual a 31, por lo que se puede afirmar que la torre no perderá su estabilidad. Asimismo, la primera frecuencia natural determinada alcanza un valor de 0.86 Hz, el cual está por debajo de la frecuencia nominal de trabajo, igual a 2 Hz, comprobándose que no ocurrirá el fenómeno de resonancia en la torre. Al contrastar estos resultados con los resultados analíticos se aprecian diferencias porcentuales de 18.42% en el factor crítico de pandeo y 4.53 % en la frecuencia natural, quedando así verificados los resultados de la simulación.

El análisis estático estructural de los componentes de la góndola mediante simulación numérica computacional permitió obtener resultados de desplazamientos y esfuerzos. El desplazamiento máximo ocurre en la rueda del generador y alcanza un valor de 2.12 mm, mientras que el esfuerzos resultante máximo de von Mises se produce cerca al soporte estator, con un valor de 229.02 MPa. Por tanto, el factor de seguridad de la góndola es igual a 1.2. Los resultados estructurales se pudieron verificar mediante cálculos analíticos para el caso del eje principal, obtenido una diferencia 0.60% en los esfuerzos

En general se puede afirmar que los modelos usados, las simplificaciones realizadas y las consideraciones tomadas para las simulaciones numéricas, permiten estudiar el comportamiento de la hélice, la torre y la góndola de manera adecuada. Los cálculos analíticos realizados para verificar los resultados de las simulaciones así lo corroboran.

RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar los resultados obtenidos en el análisis estructural de la torre y góndola mediante simulación numérica computacional como base informativa para la correcta realización del dimensionamiento y posterior selección de las uniones atornilladas.

Para el caso de los cambios de sección y las zonas donde se consideran las soldaduras entre las distintas partes que conforman la torre y góndola, se recomienda realizar ajustes en los sólidos para poder analizar su influencia con mayor detalle sobre la estructura.

Se recomienda realizar un estudio mediante simulación del conjunto de los principales elementos estructurales que conforman el aerogenerador (hélice, torre y góndola) para entender en mayor detalle la influencia que posee cada uno sobre el otro en los distintos análisis.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BALDOVINO FERNANDINI, Enrique
2008 Energía eólica en el Perú. Primera Edición. Lima: CENTRUM.
- [2] CREUS SOLÉ, Antonio
2010 Aerogeneradores. Primera edición. Barcelona: S.L. Ediciones Ceysa, Cano Pina.
- [3] HIBBELER, Russell C.
2011 Mecánica de materiales. Octava edición. México: Prentice Hall.
- [4] HIBBELER, Russell C.
2010 Ingeniería mecánica: dinámica. Doceava edición. Naucalpan de Juárez: Pearson.
- [5] RODRÍGUEZ Hernández, Jorge.
2012 Resistencia de Materiales 2. Lima: PUCP.
- [6] BEER, Ferdinand Pierre.
2013 Mecánica de materiales. Sexta edición. México: McGraw-Hill Interamericana.
- [7] SINGIRESU S., Rao
2012 Vibraciones Mecánicas. Quinta edición. México: Pearson Educación.
- [8] DIXON, Sydney Lawrence
2010 Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. Sexta edición. New York: Butterworth-Heinemann
- [9] BURTON, Tony, SHARPE, David, JENKINS, Nick y Ervin BOSSANVI
2001 Wind Energy Handbook .Primera edición. Chichester: Wiley.
- [10] LAVAYEN, Daniel
2014 Análisis de los componentes estructurales de un Aerogenerador de 3 kW mediante simulación numérica. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Faculta de Ciencias e Ingeniería.

[11] CORTEZ, Miguel

2014 Análisis aerodinámico de la Hélice de un aerogenerador tripala de eje horizontal de 3 kW mediante simulación Numérica. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[12] MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO

2006 Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica E.020 – Cargas. Lima, Perú.

[13] MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO

2006 Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica E.030 – Diseño Sismoresistente. Lima, Perú.

[14] MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO

2006 Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica E.090 – Estructuras Metálicas. Lima, Perú.

[15] CORNELL UNIVERSITY

2014 ANSYS – Wind Turbine Blade FSI (Part 2). Consulta: 25 de noviembre del 2015.<<https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=262013005>>.

[16] HAU, Erich

2005 WIND TURBINES: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Second edition. Springer-Verlag.

[17] ANSYS Inc.

2016 ANSYS Meshing Users Guide.

[18] BAILEVS, Yuri, TAKIZAWA, Kenji, TEZDUYAR, Tayfun

2012 Computational Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications. Primera edición. Wiley.