

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE UN AEROGENERADOR DE 3 kW MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,

que presenta el bachiller:

Daniel Lavayen Farfán

ASESORES:

**Herbert Yépez Castillo
Rosendo Franco Rodriguez**

Lima, Noviembre de 2014



©2014, Daniel Lavayen Farfán - PUCP

La reproducción total o parcial está permitida solamente con fines académicos, con la respectiva cita bibliográfica y referencia.

Resumen

En el mundo actual es cada vez más evidente la tendencia de cambiar las fuentes de energías tradicionales por otras que sean más limpias, eficientes, y que además estén al alcance del sector rural. Una de estas alternativas energéticas es la energía eólica, para la cual se utilizan máquinas conocidas como aerogeneradores; los cuales convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica. Dado que la velocidad del viento aumenta con la altura, se prefiere que los aerogeneradores se ubiquen a cierta distancia suelo, para lo cual cuentan con estructuras que las posicionan a la altura ideal. Dichas estructuras son típicamente torres esbeltas y deben soportar el peso de los equipos, el empuje del viento a lo largo de la estructura, cargas sísmicas, entre otras; por tal motivo el diseño de estos componentes estructurales debe tener en cuenta todos los factores de diseño para asegurar el correcto funcionamiento del aerogenerador.

La presente tesis tiene como objetivo conocer el comportamiento estático y dinámico de un aerogenerador prototipo de 3kW, como una iniciativa de apoyo al sector rural, utilizando simulación numérica por el método de elementos finitos (MEF). Para lograr el objetivo planteado se realizó un estudio previo analítico de los componentes estructurales para poder obtener valores de esfuerzos, desplazamientos y reacciones referenciales, así como un estudio vibratorio de la torre para obtener valores de frecuencias naturales referenciales. Al comparar los valores obtenidos se encontró que los errores porcentuales entre los distintos métodos estuvieron alrededor de 10%

Posteriormente se realizaron diversos ensayos en modelos cada vez más complejos hasta llegar a modelos que se asemejaron en gran medida a la estructura del aerogenerador y que también cumplieron los criterios y resultados analíticos. Luego de tener un modelo totalmente validado se procedió a cargar el modelo con distintas combinaciones de carga para evaluar el comportamiento de la estructura bajo diversas condiciones.

Después de evaluar los diversos resultados obtenidos se determinó que el mayor problema de la torre se encuentra en la unión entre la torre y cables tensores (factor de seguridad de 1.14); las cuales en caso de fallar comprometerían toda la estructura de la torre. Por lo tanto se propusieron modificaciones para evitar un colapso inmediato en caso alguna de las uniones falle.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : **ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE UN AEROGENERADOR DE 3 kW MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA**

ÁREA : Diseño # 268

PROPUESTO POR : Herbert Yépez Castillo

ASESOR : Herbert Yépez Castillo / Rosendo Franco Rodriguez

TESISTA : Daniel Lavayen Farfán

CÓDIGO : 20095349

FECHA : 10 de Octubre de 2014



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

En la actualidad, se buscan nuevas fuentes energéticas que estén al alcance del sector rural, y una de las alternativas más atractivas es la energía eólica, la cual en los últimos años se está comenzando a emplear en el Perú. Asimismo, el uso de software especializado en la ingeniería ha aportado de gran manera en las tareas de diseño y análisis, reduciendo costos y tiempos. La presente tesis forma parte de un proyecto de apoyo al sector rural en la que se analiza y estudia el comportamiento de los diferentes elementos estructurales de un aerogenerador prototipo de 3 kW empleando la simulación numérica por el método de elementos finitos (MEF). De esta manera se logra obtener, para distintas condiciones de carga, esfuerzos y desplazamientos en los principales componentes estructurales, así como las frecuencias naturales del sistema. Adicionalmente se propone mejoras en el diseño para afrontar de forma satisfactoria las condiciones más críticas de funcionamiento.



ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE UN
AEROGENERADOR DE 3 kW MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Introducción

1. Estado del arte
2. Estudio de componentes estructurales mediante métodos analíticos
3. Simulación numérica
4. Comparación de resultados

Observaciones y Recomendaciones

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas

Ing. Herbert Yépez Castillo
Asesor

Dr. Rosendo Franco Rodriguez
Asesor



DEDICATORIA

Para mis abuelos en el cielo Daniel y Beatriz, gracias por todo.

Para mi madre, que nunca dejó de apoyarme y guiarme.

Este es solo el comienzo.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre María Elena y mi hermana Lizzy Beatriz por apoyarme en los momentos difíciles y sustentar mi educación.

A mis asesores Herbert Yépez y Rosendo Franco por el continuo apoyo durante esta etapa universitaria que culminó satisfactoriamente.

A mis amigos en INACOM, Pedro Flores, Renatto Yupa, Miguel Cortez, Edward Herrera y todos los que brindaron su granito de arena en la realización de esta tesis, con sus conocimientos, consejos y experiencias.

A todos los profesores de la Sección de Ingeniería Mecánica, por brindarme los conocimientos y experiencias necesarios para enfrentarme al mundo y seguir aprendiendo.

A mis amigos de Ingeniería Mecánica, con quienes compartimos días y noches de estudio, esfuerzo y sacrificio, así como los gratos momentos a lo largo de todos estos años.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	II
Formáto FACI.....	III
<i>DEDICATORIA</i>	V
AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcance	2
Metodología.....	3
CAPÍTULO 1 - Estado del arte	4
1.1 Introducción	4
1.2 Aerogenerador de 3kW para el estudio.....	8
1.2.1 Información general.....	8
1.2.2 Condiciones de instalación.....	10
1.2.3 Condiciones de funcionamiento	11
1.3 Definición de cargas	12
1.3.1 Cargas de viento.....	12
1.3.2 Peso.....	16
1.3.3 Carga sísmica.....	17
1.4 Análisis y estudios a realizarse.....	21
1.4.1 Método LRFD.....	21
1.4.2 Métodos de energía	22
1.4.3 Análisis de estabilidad	22
1.4.4 Análisis dinámico.....	23
1.4.5 Teoría de máxima energía de distorsión.....	25
1.5 Método de elementos finitos.....	26
1.5.1 Fundamento teórico.....	26
1.5.2. Discretización	28
1.5.3. Condiciones de borde	30

1.5.4.	Procesamiento	30
1.5.5.	Post – procesamiento	32
CAPÍTULO 2 - Estudio de componentes estructurales mediante métodos analíticos		33
2.1	Introducción	33
2.2	Análisis de la torre.....	33
2.2.1	Cargas actuantes	35
2.2.2	Determinación de esfuerzos	38
2.2.3	Verificación de estabilidad: pandeo.....	39
2.2.4	Determinación de frecuencias naturales	40
2.2.5	Determinación de esfuerzos en el izaje.....	44
2.3	Análisis del eje principal.....	45
2.3.1	Cargas actuantes	45
2.3.2	Determinación de esfuerzos y deformaciones	46
2.4	Análisis de la cola	47
2.4.1	Cargas actuantes	47
2.4.2	Determinación de esfuerzos	48
CAPÍTULO 3 - Simulación Numérica		49
3.1	Introducción	49
3.2	Simulación de modelo lineal de la torre	50
3.2.1	Etapa de pre – procesamiento	50
3.2.1.1	Definición de geometría.....	50
3.2.1.2	Discretización	51
3.2.1.3	Condiciones de borde	52
3.2.2	Etapa de procesamiento	52
3.2.3	Etapa de post – procesamiento	53
3.3	Simulación de modelo sólido de la torre	54
3.3.1	Etapa de pre – procesamiento	55
3.3.1.1	Definición de geometría.....	55
3.3.1.2	Discretización	56
3.3.1.3	Condiciones de borde	58
3.3.2	Etapa de procesamiento	59
3.3.3	Etapa de post – procesamiento	59

3.4	Simulación de izaje de la torre	64
3.4.1	Etapa de pre – procesamiento	64
3.4.2	Etapa de procesamiento	66
3.4.3	Etapa de post – procesamiento	66
3.5	Simulación de ensamble de eje principal, chasis, tornamesa y cola	68
3.5.1	Etapa de pre – procesamiento	68
3.5.1.1	Definición de geometría	68
3.5.1.2	Discretización	71
3.5.1.3	Condiciones de borde	73
3.5.2	Etapa de procesamiento	74
3.5.3	Etapa de post – procesamiento	74
3.5.3.1	Resultados del eje principal	75
3.5.3.2	Resultados del chasis	76
3.5.3.3	Resultados en la bocamasa de tornamesa.....	78
3.5.3.4	Resultados del eje del tornamesa	79
3.5.3.5	Resultados de la cola del aerogenerador.....	80
3.6	Simulación del aerogenerador bajo carga sísmica.....	82
3.7	Simulación con combinaciones de carga según método LRFD	84
3.8	Simulación de condición crítica de funcionamiento	86
CAPÍTULO 4 - Comparación de resultados y propuestas de mejora		88
4.1	Comparación de resultados de la torre	88
4.1.1	Comparación de resultados de esfuerzos	88
4.1.2	Comparación de resultados de pandeo	89
4.1.3	Comparación de resultados de análisis dinámico	90
4.2	Comparación de resultados del eje principal.....	90
4.3	Comparación de resultados de eje tornamesa	90
4.4	Comparación de resultados de bocamasa de tornamesa.....	91
4.5	Comparación de resultados de la cola	91
4.6	Simulación de la primera propuesta de modificación	92
4.7	Simulación de la segunda propuesta de modificación.....	93
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....		95
CONCLUSIONES		97

BIBLIOGRAFIA.....	99
ANEXOS	1
ANEXO 1. Datos generales del aerogenerador proporcionados por la empresa.....	1
ANEXO 2. Determinación de cargas sobre el aerogenerador, correspondientes a condiciones de funcionamiento extremo de 14 m/s y 400 RPM [19] [20]	4
ANEXO 3. Determinación de propiedades geométricas de los componentes estructurales....	7
ANEXO 4. Propiedades mecánicas del acero estructural usado.	8
ANEXO 5. Programa APDL para comportamiento de cables.	9
ANEXO 6. Resultados gráficos de las simulaciones de la torre bajo distintas combinaciones de carga.....	10
A6.1 Resultados con combinación de carga – 1.4D	10
A6.2 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 1.6L.....	10
A6.3 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 0.8W	11
A6.4 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 1.6W + 0.5L	11
A6.5 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 1.0E + 0.5L.....	12
A6.6 Resultados con combinación de carga – 0.9D + 1.0E	12
A6.7 Resultados con combinación de carga – 0.9D + 1.6W.....	13

LISTA DE SÍMBOLOS

P_h	Presión de viento en función a la altura	ω_n	Frecuencia natural
C_d	Coefficiente de arrastre	σ_N	Esfuerzo normal
V_h	Velocidad de viento a determinada altura	τ	Esfuerzo cortante
Z	Coefficiente de zona	M_f	Momento flector
U	Coefficiente de uso	MF	Multiplicador de fuerza
C	Factor de amplificación sísmica	δ	Desplazamiento de un punto
S	Parámetro de suelo	k_{eq}	Rigidez equivalente
R	Factor de reducción sísmica	λ	Coefficiente de esbeltez
P	Peso propio de estructura	F_p	Fuerza crítica de pandeo
T	Periodo fundamental de estructura	σ_p	Esfuerzo crítico de pandeo
V	Cortante basal		
D	Carga muerta de la torre		
L	Carga viva de la torre		
L_r	Carga viva en techo y azotea		
S	Carga de nieve		
R	Carga de lluvia		
W	Carga de viento		
E	Carga de sismo		

INTRODUCCIÓN

Dada la gran demanda energética mundial actual, las personas deben buscar nuevas fuentes de energía para poder satisfacer esta necesidad. Durante los últimos cien años se ha recurrido principalmente a combustibles fósiles y a energía hidráulica para poder generar potencia útil; sin embargo estas fuentes tienen grandes impactos ambientales y culturales, ya que los gases de combustión afectan de sobremanera la atmósfera y las centrales hidráulicas alteran el ecosistema al inundar grandes áreas de terreno. Este es el motivo por el cual la humanidad está sustituyendo gradualmente las fuentes energéticas por nuevas fuentes “limpias”, que no afecten de manera significativa el medio ambiente. Una de las muchas alternativas energéticas es la obtención de energía del viento, es decir, energía eólica. Gracias a esta alternativa se puede producir grandes potencias capaces de satisfacer la demanda energética de una gran localidad, siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones geográficas y velocidad de viento, por lo que se deben aprovechar cada vez que estén disponibles. Para poder realizar la conversión de energía eólica a energía eléctrica se utilizan *aerogeneradores*, los cuales son máquinas que constan de una turbina eólica conectada a un generador eléctrico. Así como existen grandes aerogeneradores para la generación a gran escala de potencia, también existen otros de menor escala, los cuales se usan para producir electricidad a pequeña escala; estos últimos pueden ser utilizados en el sector rural donde los requerimientos de potencia no son muy altos y el acceso a la red eléctrica nacional se hace demasiado costoso.

Con el uso de aerogeneradores, las personas del sector rural tendrán acceso a tecnología, medios de comunicación global y podrán llevar a cabo labores cotidianas con mayor facilidad, pero dado que estos sitios son alejados, de difícil acceso y no hay personal capacitado en las cercanías, los aerogeneradores deben estar diseñados para soportar condiciones extremas de funcionamiento, y soportar eventualidades de la naturaleza.

El diseño de los elementos estructurales de un aerogenerador tradicionalmente se realiza utilizando métodos analíticos de cálculo y normativa vigente. Con el avance de la tecnología computacional, se puede complementar el proceso de diseño, verificación de los mismos, y conocer su comportamiento bajo diversas condiciones de carga y funcionamiento con una disminución drástica en el tiempo de cálculo y procesamiento de la información utilizando método de elementos finitos. El cual resulta

ser de gran utilidad a la hora de analizar geometrías complejas y diversas condiciones para un mismo modelo.

Por lo tanto, el presente trabajo pretende realizar el estudio de los diversos componentes estructurales de un aerogenerador prototipo de 3kW de la empresa Waira Energía S.A.C, utilizando el método de elementos finitos.

Objetivo general

- Realizar el análisis estructural de la torre, chasis, cola, y tornamesa de un aerogenerador de 3kW mediante simulación numérica por método de elementos finitos.

Objetivos específicos

- Definir las cargas externas que actúan sobre el sistema formado por la torre, chasis, cola, y tornamesa, incluyendo reacciones en los apoyos.
- Determinar analíticamente los esfuerzos que se generan en cada componente.
- Definir un procedimiento para el análisis estructural mediante simulación numérica.
- Determinar mediante simulación numérica los esfuerzos y deformaciones en cada componente.
- Comparar y validar los resultados obtenidos mediante simulación numérica con resultados analíticos.
- Determinar, mediante simulación, los esfuerzos en la torre bajo distintas condiciones de carga.

Alcance

Los principales productos de la tesis son un procedimiento de simulación para el análisis estructural de la torre, chasis, cola, y tornamesa; validación de resultados mediante una comparación de resultados (analíticos y simulación), y una propuesta de mejora del diseño de los componentes analizados.

Metodología

Para poder realizar el trabajo se planteó una metodología que va de la mano con los objetivos específicos planteados anteriormente.

- Identificación de las cargas presentes en la estructura, chasis, cola, y tornamesa, incluyendo reacciones en los apoyos.
- Cálculo analítico de los esfuerzos en cada componente.
- Desarrollo de modelos computacionales para el análisis estructural mediante método de elementos finitos.
- Simulación numérica para obtener los resultados de los esfuerzos y deformaciones en cada componente.
- Validación los resultados obtenidos mediante simulación numérica con resultados analíticos.
- Desarrollo de propuestas de mejora del diseño del aerogenerador de 3kW de la empresa Waira.

CAPÍTULO 1 Estado del arte

1.1 Introducción

El término energía eólica se refiere a la energía del viento, es decir, se aprovecha la velocidad (energía cinética) del viento en la producción de energía eléctrica. Para poder realizar esta transformación se utilizan máquinas conocidas como turbinas eólicas, las cuales por su forma aerodinámica y distribución geométrica permiten convertir la energía cinética del viento en trabajo mecánico en un rotor, el cual será transformado en energía eléctrica mediante un generador eléctrico. La magnitud de la energía producida dependerá del potencial eólico del lugar, el cual tiene relación directa con la velocidad del viento, por lo que se trazan mapas eólicos dependiendo de la velocidad del viento de determinada localidad. Para el caso de Perú se puede apreciar la Figura 1.

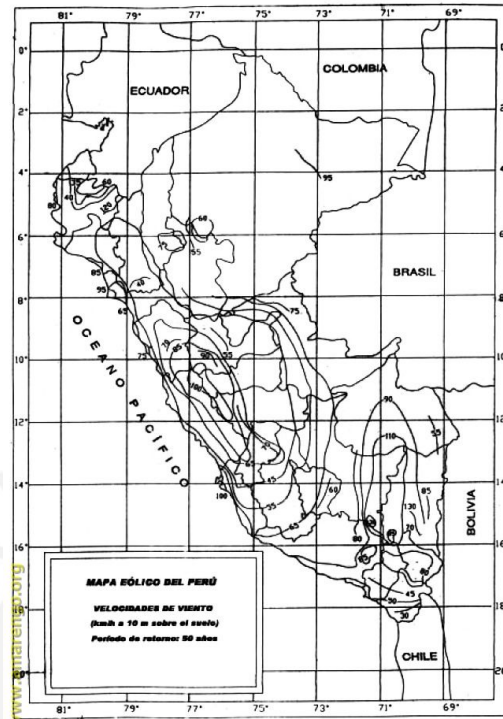


Figura 1.1 Mapa eólico del Perú. Fuente: http://amarengo.org/files/u866/T_III_101.jpg

Debido a que la energía producida dependerá de donde esté ubicado el aerogenerador, este último podrá ser utilizado para poder generar una gran cantidad de energía y alimentar una gran carga trabajando en paralelo con otros aerogeneradores si es que el potencial eólico es alto (Figura 1.2). Si en la localidad el potencial eólico es bajo, se podrán instalar aerogeneradores de bajas potencias para poder energizar un aparato o máquina específica (Figura 1.3).



Figura 1.2 Aerogeneradores de grandes potencias para producción masiva de energía eléctrica – Lone Star Wind Farm – Texas – EE.UU. Fuente: <http://assets.inhabitat.com/files/windt2.jpg>



Figura 1.3 Los aerogeneradores de baja potencia suelen ser de uso doméstico o para usos en lugares remotos donde no llegan las líneas de transmisión. A veces son usados para bombear agua o para hacer funcionar iluminación y aparatos electrónicos en el sector rural. Fuente: <http://static.soliclima.es/imagenes/aerogenerador-domestico.jpg>

Como se ve en las figuras 1.2 y 1.3, la turbina eólica está montada sobre una estructura (generalmente metálica) que posiciona a la góndola a una altura donde el viento es estable y tiene la velocidad suficiente para desarrollar la potencia necesaria. La estructura debe soportar las diversas cargas de operación, cargas de viento y cargas sísmicas, y el propio medio al cual estará expuesta. Además la carcasa o chasis donde estará alojado el generador eléctrico también debe ser resistente al medio ambiente, el rotor de transmisión debe soportar no solo las cargas variables en el funcionamiento, sino también el peso de la turbina.

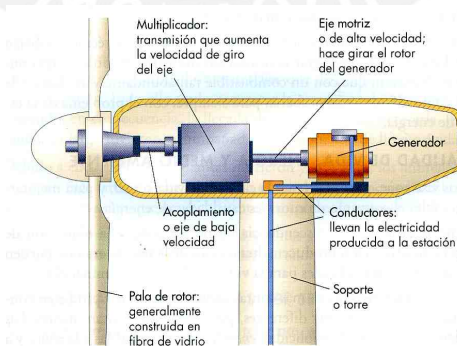


Figura 1.4 Principales partes de un aerogenerador. Fuente: Energías renovables. Funcionamiento de los aerogeneradores <http://www.renovables-energia.com/2009/05/funcionamiento-aerogeneradores-eolicos/>

Por este motivo se han realizado una gran variedad de análisis y simulaciones sobre el comportamiento de los aerogeneradores, la eficiencia que tienen bajo distintas condiciones, análisis vibratorio, fatiga, influencia de forma de la paleta, número de

álabes, dirección del viento, eficiencia, etc. Todos estos análisis se han facilitado de gran manera gracias a la ayuda de la simulación numérica, ya que se pueden obtener resultados sin la necesidad de construir prototipos reales. Sin embargo, se debe tener mucho cuidado con los resultados obtenidos por la simulación numérica ya que dependen mucho de las condiciones de borde, el procedimiento empleado, la malla usada, el tipo de elemento usado, por lo que el análisis deberá ir acompañado, en la medida de lo posible, de un estudio analítico, para que de esta manera se puedan comparar y validar los resultados.

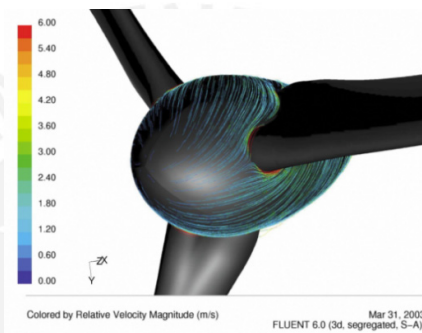


Figura 1.5 Simulación de la velocidad del viento alrededor del centro de la turbina y de las paletas [1].

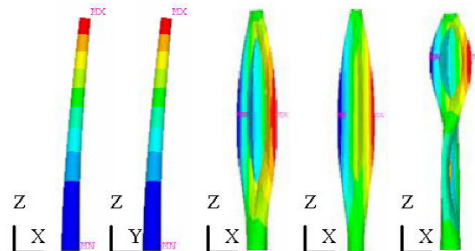


Figura 1.6 Simulación de 5 primeros modos de vibración de la torre de un aerogenerador [2].

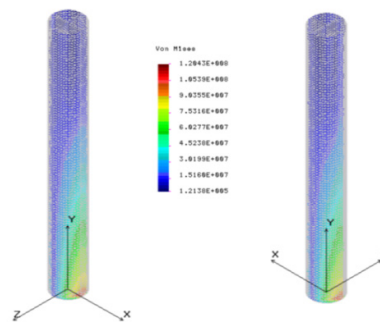


Figura 1.7 Resultados de tensiones en la torre de un aerogenerador [3].

En las figuras 1.5, 1.6 y 1.7 se pueden observar los resultados de distintos estudios hechos sobre componentes de aerogeneradores, tanto análisis de fluidos como estructurales, y todos realizados con herramientas computacionales, para que de esta manera los diseños puedan ser más eficientes, esbeltos y económicos. Esto es de especial importancia en un país en vías de desarrollo como lo es el Perú, donde estas tecnologías ecológicas se comienzan a implementar en favor del sector rural, y los software de diseño e ingeniería comienzan a hacerse cada vez más utilizados.

Por este motivo, la presente tesis se hará cargo del análisis de los principales elementos estructurales utilizando un paquete de software de elementos finitos, los componentes a analizar serán la torre, el chasis y la cola, el eje principal y el tornamesa de un aerogenerador prototipo de 3kW.

1.2 Aerogenerador de 3kW para el estudio

1.2.1 Información general

El aerogenerador objeto de estudio se trata de un modelo prototipo WAIRA 5.0 de la empresa Waira Energía S.A.C, el cual tiene una torre metálica tubular de 13 metros de altura y 114 mm de diámetro y un rotor de 5 metros de diámetro. A una velocidad de 10 m/s de viento, el aerogenerador puede generar una potencia nominal de 3 kW y velocidad nominal de 300 RPM, pero se demostró que en ciertas condiciones puede llegar a generar hasta 4 kW de potencia eléctrica. Actualmente se encuentra instalado en el departamento de Ica.



Figura 1.8. Aerogenerador WAIRA 5.0. Fuente: <http://www.waira.com.pe/productos/waira-5-0/>

El diseño del aerogenerador contempló que este pudiera ascender y descender de su posición de trabajo para la instalación y mantenimientos necesarios mediante una maniobra de izamiento, por lo que se consideró que la torre se encuentre pivotada en

la parte inferior a una base (compuesta de planchas de acero soldadas), la cual a su vez está cimentada a tierra. Para evitar que la torre se desplace, gire fuera de su posición (dado que aun posee un grado de libertad) y que se den desplazamientos excesivos, se usan dos juegos de cables tensores de acero, como se aprecian en la figura 1.9, los cuales tienen un diámetro de 3/16" y una longitud de 12 m (cables superiores) y 7.88 m (cables inferiores). Adicionalmente, el ensamble de la turbina posee un tornamesa, el eje del tornamesa se encuentra empernado a la torre mientras que la bocamasa del tornamesa se mantiene empernada al chasis del aerogenerador (ver anexo 1).

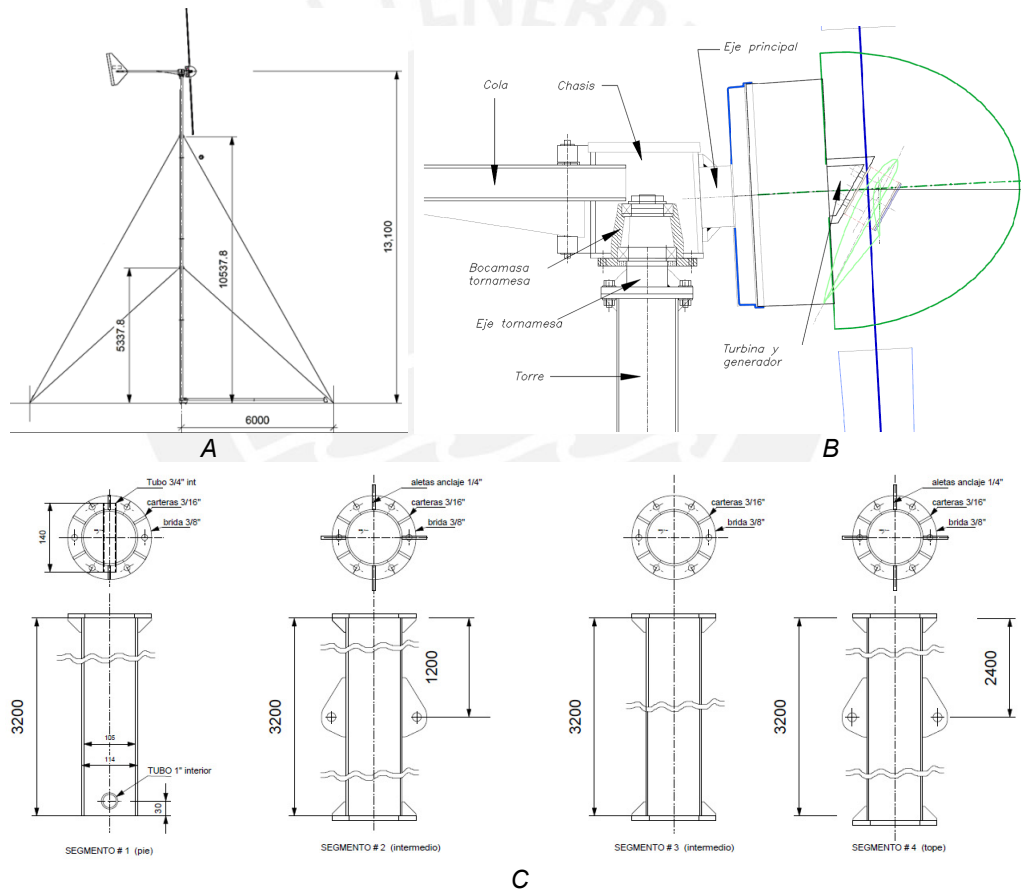


Figura 1.9. Detalles del aerogenerador, donde se puede apreciar la distribución de cables y los detalles del ensamble del chasis, cola, tornamesa, eje principal. C) Detalle de los cuatro segmentos que conforman la torre del aerogenerador. Cortesía de Waira Energía SAC.

Para las palas del aerogenerador se utilizaron perfiles aerodinámicos NACA 4412 (ver figura 1.10), con una variación de cuerda y torsión geométrica a lo largo de toda la pala, sin embargo por problemas de fabricación el perfil deseado no se realizó de

manera correcta en toda la pala, existiendo zonas con perfiles de mayor espesor que el indicado.

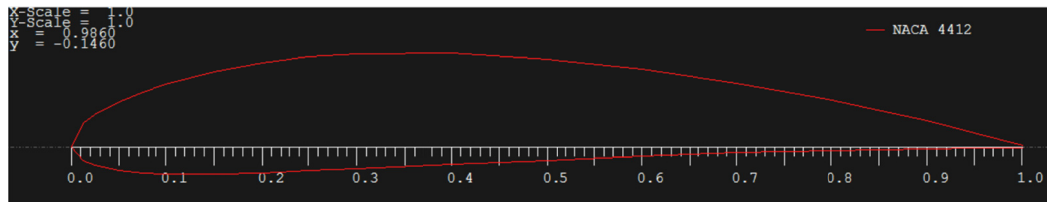


Figura 1.10. Imagen del perfil NACA 4412. Fuente: Elaboración propia.

1.2.2 Condiciones de instalación

Previo a la instalación del aerogenerador se realizó una cimentación, sobre la cual se encuentra montada una base fabricada con planchas de acero de 3/16"

Como fue mencionado anteriormente, la torre de aerogenerador se encuentra articulada en la base para realizar la maniobra de izamiento. Dicha maniobra requiere de la asistencia de una torre auxiliar de igual diámetro y menor longitud que la torre principal (5.5 metros). Inicialmente la torre principal se encuentra en posición horizontal con tres cables conectados con la punta de la torre auxiliar, la cual se coloca en posición vertical, se procede a jalar uno de los cables de la torre auxiliar, de manera que pase a posición horizontal y haciendo que de esta manera la torre principal pase a posición vertical. En la figura 1.11 se puede apreciar el montaje del aerogenerador, en plena maniobra de izaje con ayuda de la torre auxiliar.



Figura 1.11 Montaje de aerogenerador. Cortesía de Waira Energía SAC.

1.2.3 Condiciones de funcionamiento

Las condiciones de funcionamiento nominales del aerogenerador Waira 5.0 corresponden a una velocidad nominal de viento de 10 m/s y una velocidad de rotación del rotor de 300 revoluciones por minuto. Según los planos y esquemas provistos por la empresa, el aerogenerador debe resistir las siguientes cargas asociadas al funcionamiento a condiciones nominales, el detalle de estas cargas puede apreciarse en el Anexo 1:

- Torque en el rotor (eje principal): 245 N.m
- Peso del rotor del generador: 550 N
- Peso del eje principal: 88.2 N
- Empuje resultante en el rotor: 1180 N
- Peso de la armadura y bobinado del generador: 362 N

Sin embargo, dado que las cargas y condiciones presentadas anteriormente no son constantes en el tiempo se planteó utilizar los datos de las cargas extremas de funcionamiento del aerogenerador; las cuales son una velocidad de viento de 14 m/s y una velocidad de giro del rotor de 400 RPM, para lo cual se usó los resultados obtenidos de un estudio aerodinámico realizado en trabajos de tesis anteriores [19] y [20].

La torre está formada por cuatro segmentos de 3.2 metros cada uno. La base está articulada con un pin de 19 mm en la base (lo que permite que sea pivotante), además posee dos (2) juegos de cuatro (4) tensores de cable de acero inoxidable a 5.2 y 10.4 metros de la base respectivamente. Las bridas con las cuales se unen los segmentos están unidas con tornillos M10. Existe un tramo libre de 2.4 m en el tope para que pueda girar el rotor libremente. Este extremo libre es crítico al momento de iniciar la maniobra con la torre horizontal y por ello se le coloca un cable tensor a la punta que luego es recogido y asegurado a la base.

1.3 Definición de cargas

Los aerogeneradores al ser estructuras altas están sometidos a una variedad de cargas entre las que se encuentran la carga de viento, los pesos de los componentes, y cargas sísmicas las cuales se toman como consideración de diseño en forma de una fuerza cortante basal.

Para poder definir el valor de cada una de ellas se puede recurrir a diversas normas, como lo son el reglamento nacional de edificaciones (RNE) y el AISC Steel Construction Manual.

Si bien existen otras normativas internacionales, todas apuntan a que de preferencia se utilicen normas propias a la región o país donde se instalará la estructura, debido a que cada una tiene sus particularidades las cuales, en la mayoría de casos, se han tomado en cuenta en la elaboración de los documentos técnicos; en el caso del Perú, es un país sísmico, por lo que se prefirió utilizar normativa peruana para la evaluación de la estructura.

1.3.1 Cargas de viento

El viento al ser un fluido (aire) en movimiento, generará una distribución de presiones de arrastre y sustentación en las palas y en la estructura. Si bien este es el principio que se usa en las palas para poder hacerlas girar y generar potencia, es tal la fuerza del viento que las mismas palas deben poder resistir la deflexión excesiva como se aprecia en la figura 1.12.



Figura 1.12 Deflecciones en paletas de aerogeneradores Vestas V80 [4].

El viento además de generar fuerzas distribuidas en la pala, también generará fuerzas que se trasladarán con momentos a la estructura, que podrán generar torsión y deflexión.

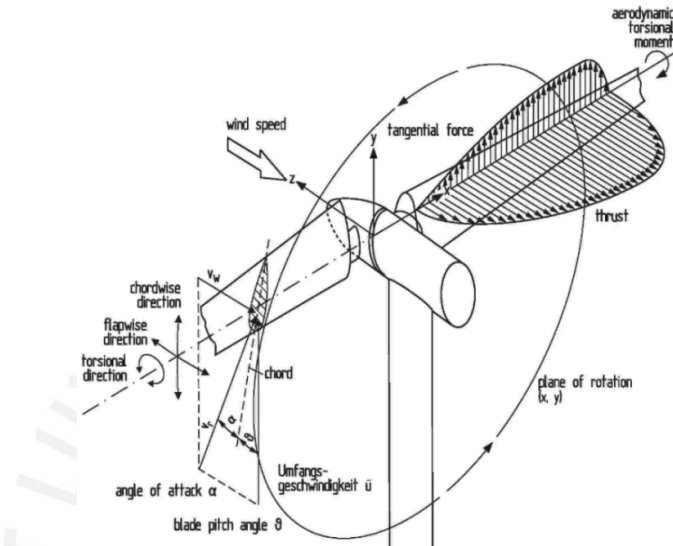


Figura 1.13 Distribución de fuerzas sobre un las paletas de un aerogenerador [5].

Gracias al estudio previo sobre las palas del aerogenerador mencionado con anterioridad, se pudo determinar las fuerzas actuantes sobre las mismas, dicho estudio se realizó en un software CFD, los resultados se muestran a continuación en la tabla 1.1, el resumen del estudio se puede apreciar en el **Anexo 2**.

Tabla 1.1. Cargas sobre las palas a condiciones extremas (400 RPM y 14 m/s) obtenidas de simulación numérica en CFX

Fuerza X (N)	-1675
Fuerza Y (N)	-9.97
Fuerza Z (N)	3.34
Momento X (Nm)	273.96
Momento Y (Nm)	25.65
Momento Z (Nm)	-3.048

El proceso de simulación CFD es similar al de los elementos finitos, con la diferencia que la discretización se realiza sobre un volumen de control, en este caso, el volumen de aire que rodea al aerogenerador, obteniéndose como resultados las velocidades vectoriales y presiones en los elementos. Los resultados obtenidos luego son procesados y mostrados de manera similar al método de elementos finitos.

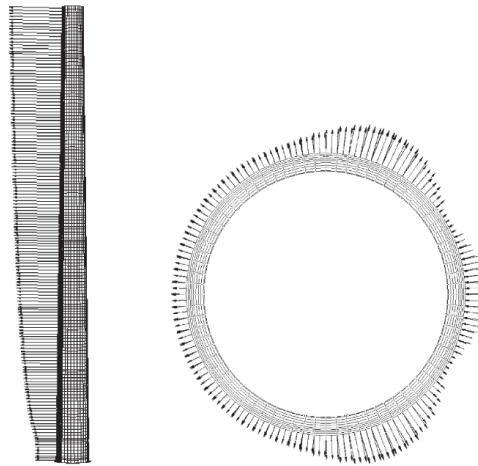


Figura 1.14 Distribución del viento a lo largo y alrededor de la torre de un aerogenerador [6].

Adicional a la carga generada por el funcionamiento, la fuerza de arrastre generada en la estructura no es constante debido a que el perfil de velocidad del viento tampoco lo es, como se aprecia en la figura 1.14. Si bien existen numerosos modelos para poder obtener una aproximación al perfil de velocidades del viento, se tomará el proporcionado por el reglamento nacional de edificaciones, donde la presión dependerá de un factor C obtenido de la tabla 1.2, y la velocidad dependerá de la ecuación 1.1 obtenida de la norma E0.20 [7].

$$P_h = 0.005 \cdot C_d \cdot V_h^2 \quad (1.1)$$

$$V_h = V * (h/10)^{0.22} \quad (1.2)$$

Donde:

- P_h : Presión o succión del viento a una altura h en kgf/m²
- V_h : Velocidad de diseño a la altura h en km/h
- V : Velocidad del viento a una altura de 10m.
- h : Altura sobre el terreno en metros.

Tabla 1.2. Factor Cd para el cálculo de presión [7]

CONSTRUCCIÓN	BARLOVENTO	SOTAVENTO
Superficies verticales de edificios	+0,8	-0,6
Anuncios, muros aislados, elementos con una dimensión corta en la dirección del viento	+1,5	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica	+0,7	
Tanques de agua, chimeneas, y otros de sección cuadrada o rectangular	+2,0	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45°	±0,8	-0,5
Superficies inclinadas a 15° o menos	+0,3-0,7	-0,6
Superficies inclinadas entre 15° y 60°	+0,7-0,3	-0,6
Superficies inclinadas entre 60° y la vertical	+0,8	-0,6
Superficies verticales ó inclinadas (planas ó curvas) paralelas a la dirección del viento	-0,7	-0,7

* El signo positivo indica presión y el negativo succión.

A pesar de que el aerogenerador es pequeño en potencia y altura, existe una distribución de velocidades de viento a lo largo de la altura de la torre, como se muestra e la figura 1.15.

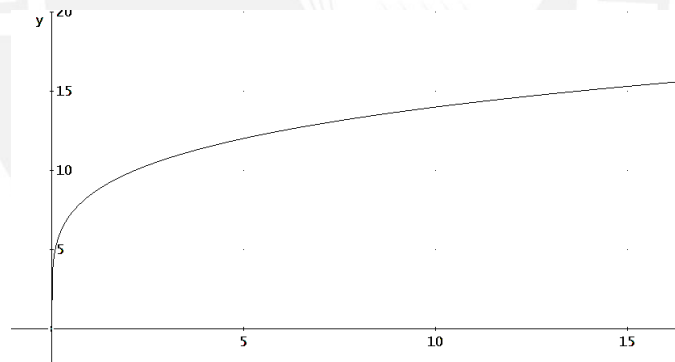


Figura 1.15 Velocidad del viento (y), en función de la altura (x), cuando la velocidad a 10m es de 14 m/s. Ec. $y = 14\left(\frac{x}{10}\right)^{0.22}$

De las anteriores expresiones se procedió a calcular la fuerza del viento. La cual se determinó como una fuerza que depende de la altura de la siguiente manera:

$$dF = D * P * dy \tag{1.3}$$

Donde

- dF es un diferencial de fuerza a una altura y .
- P_h es la presión del viento en función de la altura
- D es el diámetro de la torre.

De las ecuaciones mostradas se pudo obtener el valor de las fuerzas en cada uno de los cuatro tramos que conforman la torre.

Cabe resaltar que las cargas de funcionamiento se consideraron como carga viva y no directamente como carga de viento. Para aplicar la carga de viento a lo largo de la torre, se dividió la fuerza en cuatro tramos (para cada uno de los tramos de la torre del aerogenerador), de acuerdo a la ecuación 1.3, obteniéndose las siguientes cargas, que se pueden apreciar en la figura 1.16.

Tabla 1.3. Valores de fuerzas sobre la torre del aerogenerador

f_{w1}	42.783 N
f_{w2}	73.294 N
f_{w3}	92.044 N
f_{w4}	106.819 N

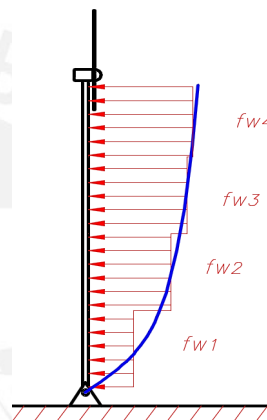


Figura 1.16. Distribución de fuerzas de viento sobre aerogenerador

1.3.2 Peso

Dado que la potencia de aerogenerador depende del diámetro del rotor y; a mayor diámetro, mayor peso; en aerogeneradores grandes el peso será una carga muy importante, en la figura 1.17 se puede apreciar el aumento de diámetro con el aumento de potencia.

Swept Area Rule of Thumb				
Swept Area, Rotor Diameter, and Nominal Power Rating				
Swept Area		Rotor Diameter		Power
(m ²)	(ft ²)	(m)	(ft)	Rating (kW)
1	10	1.1	4	0.10
5	50	2.5	8	0.75
10	110	3.6	12	1.00
50	540	8	26	10-20
100	1080	11	37	25-40
500	5380	25	83	200-250
1,000	10,800	36	118	300-400
2,000	21,500	50	164	500-700
3,000	32,300	62	203	800-1,000
4,000	43,000	71	233	1,000-1,500
5,000	53,800	80	262	1,500-2,500

Figura 1.17 Relacion de potencias con el diámetro del rotor. Fuente: <http://www.tfcenergy.com/wind-energy-large-wind-swept-area-rule-of-thumb.htm>

Al aumentar la potencia del aerogenerador, también lo hará el diámetro del rotor, y por lo tanto el peso de la turbina y del generador aumentarán, haciendo necesaria una estructura más rígida y resistente. Es por este motivo que la estructura debe analizarse principalmente por pandeo y resistencia a la flexión, así como comprobar que la deformación no sea muy elevada.

A partir de los datos proporcionados por la empresa Waira, así como del desarrollo de las piezas que conformarán el aerogenerador, se definió que el peso de la turbina, palas, generador, chasis, tornamesa y cola es de 200kg. Adicionalmente, el peso de la estructura se definió como de 140kg.

1.3.3 Carga sísmica

El Perú se encuentra en una zona conocida como el “Cinturón de fuego del Pacífico”, la cual es una zona con elevada actividad volcánica y sísmica; por tal motivo, el diseño debe considerar que el aerogenerador pueda resistir la carga y movimiento correspondiente a los sismos típicos de la región. Se puede obtener datos de sismos de acelerogramas, los cuales indican el espectro de frecuencias del sismo y esta información puede ser usada para realizar un estudio de las magnitudes y cargas sísmicas a tener en cuenta.

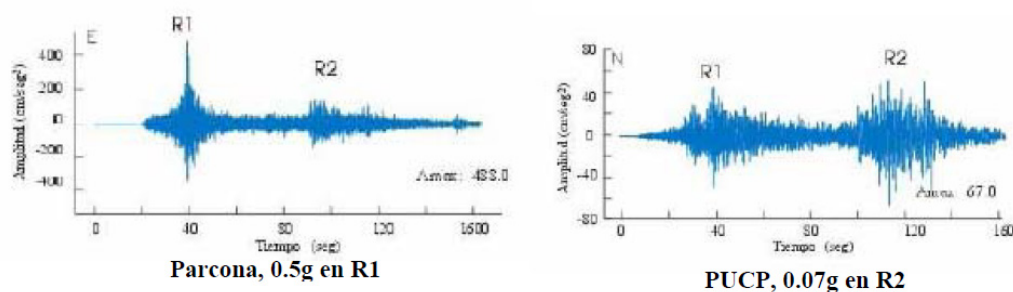


Figura 1.18. Acelerogramas del sismo de 15 de agosto de 2007, correspondientes a dos estaciones, donde se distinguen dos frentes de ruptura. En la estación Parcona, el frente R1 tiene una aceleración horizontal de 0.5g, mientras que en la estación PUCP, la ruptura R2 tiene una aceleración de 0.07g. [8]

A pesar de que el país se encuentra en una zona sísmica, existen partes de él que son más o menos vulnerables a los sismos. Por este motivo, se planteó un procedimiento de cálculo en la norma E.030 “Diseño Sismo-Resistente” [9] en el que se obtiene una fuerza cortante en la base de la estructura. El primer paso de este cálculo es definir la zona donde estará situada la estructura. Como expresado con anterioridad, el aerogenerador se encuentra en Ica, en la figura 1.19 se indica el factor de zona Z.

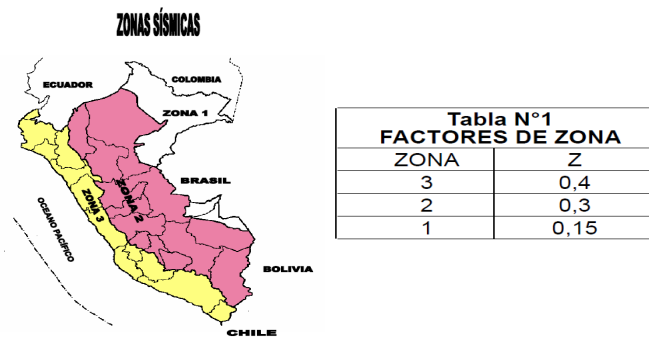


Figura 1.19. Zonificación del Perú de acuerdo a su sismicidad observada, características generales de movimientos sísmicos y la atenuación de estos. El factor Z se interpreta como la aceleración máxima del terreno con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años [9].

Otro factor de importancia es el tipo de suelo en el que estará montada la estructura, ya que distintos tipos de suelo se comportan de distinta manera e incluso puede darse un fenómeno de licuefacción del suelo en un movimiento sísmico, lo cual haría colapsar la estructura y destruir el aerogenerador. Debido a que el aerogenerador se encuentra ubicado en el departamento de Ica, se definió que se encuentra en la zona 3, por lo que:

$$Z = 0.4$$

Tabla 1.4. Parámetros de suelo. Fuente: Artículo 6 – [9].

Tipo	Descripción	T_p (s)	S
S ₁	Roca o suelos muy rígidos	0,4	1,0
S ₂	Suelos intermedios	0,6	1,2
S ₃	Suelos flexibles o con estratos de gran espesor	0,9	1,4
S ₄	Condiciones excepcionales	*	*

(*) Los valores de T_p y S para este caso serán establecidos por el especialista, pero en ningún caso serán menores que los especificados para el perfil tipo S₃.

Conociendo el tipo de suelo se puede conocer el factor de amplificación sísmica del terreno usando una fórmula proporcionada en el Artículo 7.

$$C = 2.5 * \frac{T_p}{T} \tag{1.4}$$

El periodo fundamental T se determina con la siguiente expresión:

$$T = \frac{h_n}{C_T} \tag{1.5}$$

Donde h_n es la altura del edificio en metros y C_T es un factor que depende del tipo de edificación. Con estos factores en cuenta se definió que el tipo de suelo en el que está el aerogenerador es intermedio según la clasificación de la tabla 1.4. Además, dado que el aerogenerador es de 13 metros y considerando un C_T de 35

$$S = 1.2 \quad , \quad T_p = 0.6$$

$$T = \frac{13}{35} = 0.3714$$

$$C = 2.5 * \frac{0.6}{0.3714} = 4.038$$

Adicionalmente el Artículo 10 clasifica a las estructuras de acuerdo a un coeficiente de uso e importancia, según se describe en la tabla 1.4 De la misma manera se pueden otros coeficientes para el cálculo de acuerdo a la clasificación de la estructura. Según la configuración estructural (Artículo 11) se puede clasificar a la estructura en regular o irregular; dado que la torre del aerogenerador es continua verticalmente se la puede clasificar como una *Estructura Regular*.

Tabla 1.5. Coeficiente de uso e importancia para diseño sismo resistente. Fuente: Artículo 10 – [9].

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U
A Edificaciones Esenciales	Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después que ocurra un sismo, como hospitales, centrales de comunicaciones, cuarteles de bomberos y policía, subestaciones eléctricas, reservorios de agua. Centros educativos y edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre. También se incluyen edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, como grandes hornos, depósitos de materiales inflamables o tóxicos.	1,5
B Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas como teatros, estadios, centros comerciales, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos, bibliotecas y archivos especiales. También se considerarán depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento	1,3
C Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes, cuya falla ocasionaría pérdidas de cuantía intermedia como viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios, fugas de contaminantes, etc.	1,0
D Edificaciones Menores	Edificaciones cuyas fallas causan pérdidas de menor cuantía y normalmente la probabilidad de causar víctimas es baja, como cercos de menos de 1,50m de altura, depósitos temporales, pequeñas viviendas temporales y construcciones similares.	(*)

Tabla 1.6. Coeficiente de reducción de carga sísmica según el Sistema estructural. Fuente: Artículo 12 – [9]

Sistema Estructural	Coefficiente de Reducción, R Para estructuras regulares (*) (**)
Acero	
Pórticos dúctiles con uniones resistentes a momentos.	9,5
Otras estructuras de acero:	
Arriostres Excéntricos.	6,5
Arriostres en Cruz.	6,0
Concreto Armado	
Pórticos ⁽¹⁾ .	8
Dual ⁽²⁾ .	7
De muros estructurales ⁽³⁾ .	6
Muros de ductilidad limitada ⁽⁴⁾ .	4
Albañilería Armada o Confinada ⁽⁵⁾ .	3
Madera (Por esfuerzos admisibles)	7

El peso de la estructura (P) o edificación se obtendrá adicionando un porcentaje de la carga viva a la carga muerta de la estructura:

- En edificaciones de las categorías A y B, se tomará el 50% de la carga viva.
- En edificaciones de la categoría C, se tomará el 25% de la carga viva.
- En depósitos, el 80% del peso total que es posible almacenar.
- En azoteas y techos en general se tomará el 25% de la carga viva.
- En estructuras de tanques, silos y estructuras similares se considerará el 100% de la carga que puede contener.

Debido a que el aerogenerador se consideró como una estructura importante, se la clasificó como B en la tabla 1.5 y se obtuvo

$$U = 1.3$$

El factor R se obtuvo considerando los arriostres de la estructura en cruz, por lo que:

$$R = 6$$

Por último el peso de la estructura se consideró sumando todos los pesos, tanto de la turbina como de la torre

$$P = 370 \text{ kg}$$

Conocidos todos los factores Z, U, C, S, P, R de los artículos anteriormente seleccionados se puede obtener fuerza cortante en la base de la estructura:

$$V = \frac{ZUCS}{R} * P \quad (1.6)$$

$$V = \frac{0.4 * 1.3 * 4.038 * 1.2}{6} * 370 = 155.38 \text{ kgF}$$

1.4 Análisis y estudios a realizarse

1.4.1 Método LRFD

Según las normas incluidas en el RNE y AISC 341-05 [10], la estructura debe ser capaz de resistir diversas combinaciones de cargas, las cuales están dictadas por el método LRFD (Diseño por factores de carga y resistencia por sus siglas en inglés). Si bien este método se aplica más a otro tipo de estructuras, como techos tijerales, parabólicos etc., su aplicación en el aerogenerador permitió evaluar el diseño del aerogenerador. Las combinaciones de carga se ilustran a continuación:

- 1.4D
- $1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$
- $1.2D + 1.6(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) + (0.5L \text{ ó } 0.8W)$
- $1.2D + 1.6W + 0.5L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$
- $1.2D \pm 1.0E + 0.5L + 0.2S$
- $0.9D \pm 1.6W \text{ ó } 1.0E$

Donde:

- D (Dead load). Carga muerta, donde se considera el peso de todos los elementos estructurales o cargas constantes.
- L (Live load). Carga viva, se refiere a todas las cargas que pueden variar su valor en el tiempo.
- L_r (Live roof load). Carga viva en el techo, esta carga es importante en las edificaciones ya que mide la carga en las azoteas y techos.
- S (Snow load). Carga originada por el peso de la nieve sobre la estructura.
- E (Earthquake load). Carga sísmica ocasionada por movimientos sísmicos.
- W (Wind load). Carga originada por el viento.
- R (Rain load). Carga originada por excesiva lluvia o formación de hielo en la estructura.

Dado que en el entorno no se dan nevadas, ni posibilidades de lluvia, no se consideraron las cargas de nieve S ni R. Así también se despreció el efecto de L_r al ser esta una estructura simple y no poseer una azotea o techo. Por lo anteriormente expuesto, solo se consideró la carga muerta (peso propio de la estructura), carga viva

(cargas asociadas al funcionamiento), carga sísmica (obtenida mediante norma) y carga de viento (obtenida mediante norma y datos del lugar). Se consideraron los casos más desfavorables para la verificación.

1.4.2 Métodos de energía

Para la obtención de desplazamientos en estructuras y vigas en general se puede emplear el segundo teorema de Castigliano (1847-1884), el cual enuncia lo siguiente:

“La derivada parcial de la energía total de deformación, expresada en función de las caras sobre un sistema elástico, con respecto a una de las fuerzas, representa el desplazamiento del punto de aplicación de dicha fuerza en su dirección”. [10]

Expresando el enunciado anterior matemáticamente se deduce la expresión 1.7:

$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial F_i} \quad (1.7)$$

Y para el caso especial de una viga donde solo se toma en cuenta los momentos flectores para la deformación se deduce la expresión 1.8:

$$\delta_i = \int \frac{M}{EI} \left(\frac{\partial M}{\partial F_i} \right) dx \quad (1.8)$$

1.4.3 Análisis de estabilidad

Al tratarse la torre del aerogenerador de una estructura esbelta debe verificarse de que no tenga problemas de estabilidad, es decir, falle por pandeo. Para realizar esta comprobación se escogió el método de Euler, ya que es un método muy aproximado a la realidad y aceptado por las normas, con el cual se obtienen los esfuerzos críticos de pandeo (o fuerzas críticas de pandeo) en función a el factor de esbeltez (ecuación 1.9), el cual es un factor adimensional que relaciona la longitud efectiva de pandeo y el radio de giro de la sección.

$$\lambda = \frac{L_p}{i} \quad (1.9)$$

El valor de L_p se conoce como longitud equivalente de pandeo y depende de la rigidez de los apoyos del componente a analizar. Para que la aproximación por el método de Euler sea válida, el valor del factor de esbeltez debe ser relativamente alto, generalmente mayor a 100, ya que si es muy bajo el elemento a analizar fallará por fluencia antes que por pandeo. De cumplirse esta condición se puede encontrar el esfuerzo de pandeo mediante la expresión 1.10.

$$\sigma_P = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (1.10)$$

Del mismo modo se puede obtener la fuerza crítica de pandeo (ecuación 1.11).

$$F_P = \frac{\pi^2 EI}{L_p^2} \quad (1.11)$$

Adicionalmente existe otro método para analizar estructuras el cual se trata del método Omega, sin embargo su aplicación para este tipo de estructuras es limitada debido a que dicho método requiere que los extremos del miembro a analizar se encuentren empotrados, el cual no es el caso de la estructura analizada.

1.4.4 Análisis dinámico

Las vibraciones mecánicas son variaciones u oscilaciones repetitivas en el tiempo de los diferentes parámetros de movimiento de un cuerpo, es decir, posición, velocidad y aceleración, que se dan por distintas causas. Por lo general, las máquinas y estructuras experimentarán cierto grado de vibración al existir en ellas cargas repetitivas asociadas al funcionamiento, por ejemplo, un motor o un generador con desbalance. Para poder conocer el comportamiento de la máquina o estructura bajo cargas repetitivas se necesita determinar las frecuencias naturales del sistema, la cual es la frecuencia a la cual vibraría el sistema si se le permitiera oscilar libremente. Adicionalmente también es necesario conocer el grado de amortiguamiento que pueda existir en el sistema, sin embargo, a diferencia de la frecuencia natural, el amortiguamiento del sistema solo se puede determinar experimentalmente. Por lo general la mayoría de problemas de ingeniería puede tratarse como sistemas de un grado de libertad, con una frecuencia natural como se ve en la figura 1.20. [11]

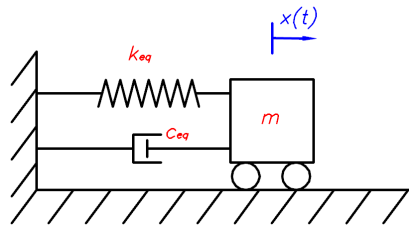


Figura 1.20. Sistema vibratorio de un grado de libertad, compuesto por una masa m , una rigidez equivalente del sistema k_{eq} y un amortiguamiento equivalente c_{eq} .

En el sistema mostrado en la figura 1.20 se puede determinar la frecuencia natural aplicando la segunda ley de Newton a la masa y despejando, obteniéndose la expresión 1.12, de la cual la frecuencia natural se define en la ecuación 1.13.

$$m\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = F_0\text{sen}(\omega t) \quad (1.12)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.13)$$

En general se pueden conocer las frecuencias naturales de todo sistema vibratorio empleando la expresión 1.14 la cual es una forma más general de la expresión 1.12:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1.14)$$

Para el caso especial de vibración libre sin amortiguamiento se tiene:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (1.15)$$

$$[K - \omega_0^2 M]\{x\} = \{0\} \quad (1.16)$$

Obteniendo la determinante de la matriz $[K - \omega_0^2 M]$ e igualándola a cero se pueden obtener los valores de las frecuencias naturales, es decir, los valores propios. Con ellos se puede usar la expresión $[K - \omega_0^2 M]\{x\} = \{0\}$ para poder obtener los vectores propios, es decir, los modos de vibración.

El sistema vibratorio del aerogenerador está compuesto por las masas de todos los cuerpos y la rigidez proporcionada por los cables y la misma torre; por lo que es de vital importancia conocer las frecuencias naturales del sistema. Si existiera un desbalance en las palas del aerogenerador, al estar girando se generaría una fuerza oscilante que podría excitar alguno de los modos fundamentales de vibración de la

estructura, haciendo que las amplitudes de oscilación crezcan hasta que se llegue al estado crítico y falle.

1.4.5 Teoría de máxima energía de distorsión

La teoría de máxima energía de distorsión es un criterio de falla expuesto por Richard Edler von Mises (1883-1953), y propuesto por Tytus Maksymilian Huber (1872-1950) la cual se basa en conceptos de energía de deformación, y es actualmente la teoría más usada y aceptada para establecer criterios de falla en materiales dúctiles, asimismo es el criterio usado por defecto por el software ANSYS para encontrar los esfuerzos equivalentes. Este teorema enuncia lo siguiente:

“La falla se produce si el valor de la energía de distorsión por unidad de volumen del material es igual a la energía de distorsión por unidad de volumen requerida para causar fluencia en una probeta de prueba a tracción del mismo material”. [2]

Al expresar y reducir las expresiones de los tensores de esfuerzos, ley de Hooke y energía se tiene:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} = \sigma_{eq} < \sigma_F \quad (1.17)$$

Donde

- σ_i son los esfuerzos principales del elemento diferencial.
- σ_F es el esfuerzo de fluencia obtenido del ensayo de tracción.

Para el caso particular de estado plano de esfuerzos donde se aplican un esfuerzo normal σ_x y un esfuerzo cortante τ_{xy} se puede aplicar la siguiente expresión:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} = \sigma_{eq} \quad (1.18)$$

1.5 Método de elementos finitos

1.5.1 Fundamento teórico

El método de elementos finitos consiste en un método numérico utilizado en ingeniería para poder dar resultados aproximados en base a una discretización del problema real, el nivel de aproximación dependerá de la precisión del modelo la cual está dada por diversos factores. Para poder resolver este tipo de problemas, se crean modelos geométricos en computadora a partir de geometrías reales; a continuación se procede a discretizar el modelo (mallado), es decir, dividir el sólido en elementos de menor dimensión y se construye una matriz con los desplazamientos de cada uno de los grados de libertad de los nodos del elemento, una vez construida la matriz, se aplican diversas condiciones de carga y restricciones de movimiento (empotramientos, apoyos simples, apoyos articulados, etc.) los cuales representan las cargas y soportes del modelo, sin los cuales la ecuación matricial formulada no tendría solución.

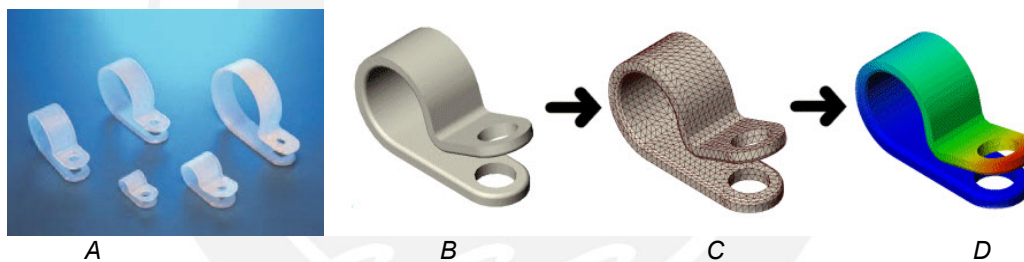


Figura 1.21. A) Pieza real, problema físico. B) Representación geométrica en computadora C) Discretización o mallado. D) Solución y representación gráfica de resultados. Fuentes: <http://blogs.solidworks.com/teacher/2012/11/new-certification-exam-certified-solidworks-simulation-associate-fea-1.html> y <http://www.infosolucion.com/data/productos/abrazaderas%20de%20plastico.jpg>

En la figura 1.21 se puede observar el procedimiento general del método de elementos finitos, en el que de una pieza del mundo físico, es decir, un problema físico (figura 1.21A) se puede resolver solucionando un problema matemático en computadora (figura 1.21C), obteniéndose resultados de esfuerzos y deformaciones (figura 1.21D), de esta manera los diseños pueden ser optimizados y mejorados sin la necesidad de construir prototipos reales.

Sin embargo, si las condiciones ingresadas no son las correctas, o la malla no es la adecuada para el modelo geométrico, se obtendrán resultados con un margen de error mayor al aceptable; por tal motivo se deben validar los resultados obtenidos. Para

poder realizar la validación generalmente se pueden emplear ecuaciones conocidas para obtener de manera analítica reacciones, esfuerzos, deformaciones etc., como también se pueden recurrir a resultados experimentales.

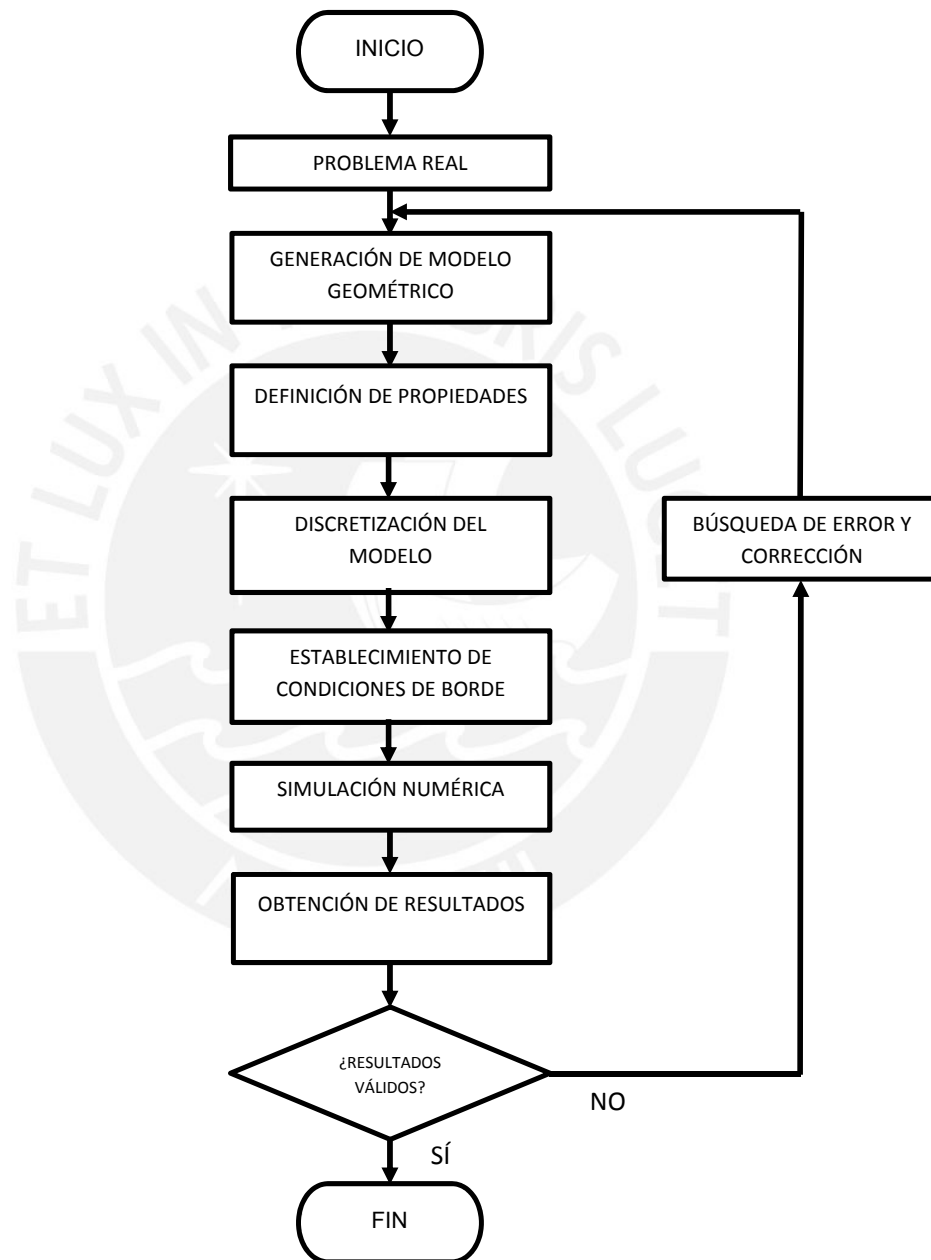


Figura 1.22. Esquema seguido en simulaciones numéricas

1.5.2. Discretización

La discretización o mallado se refiere a la división de un cuerpo en elementos más pequeños para que pueda ser analizado. Los resultados obtenidos en cualquier simulación estarán en directa relación con el tamaño de malla y el tipo de elementos usados.

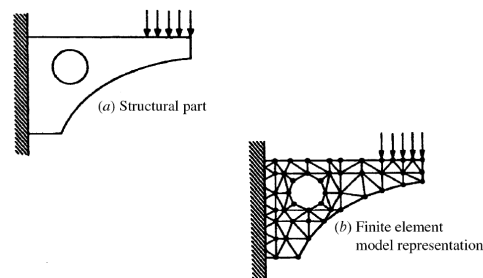


Figura 1.23. Ejemplo de discretización [12].

Los elementos usados pueden ser lineales o de orden superior, dependiendo si existen nodos intermedios dentro del elemento. En base a la malla se construirá la matriz de rigidez del sistema.

Por lo anterior expuesto se definen ciertos parámetros adimensionales con los que se puede conocer si la malla es apta para el cálculo o si debe ser mejorada. Algunos de los parámetros más usados son:

- Element quality (calidad de elemento): Es un número que varía de 0 a 1 y está basada en la proporción que existe entre el volumen del elemento y la dimensión de las aristas del elemento finito. Una calidad de elemento de 1 indica un cubo perfecto, mientras que un 0 indica un volumen de cero o hasta negativo.
- Aspect Ratio. Es la relación entre la longitud de las aristas del elemento. El valor del Aspect Ratio puede variar de 1 en adelante, donde 1 es el valor de un triángulo equilátero.
- Jacobian Ratio: Si en un elemento triangular o cuadrático, el nodo intermedio (midside node) se encuentra al medio de la arista, tendrá un Jacobian Ratio de 1, en caso este nodo se alejara de esta posición, el Jacobian Ratio aumentará hasta “romper” el elemento.

- **Parallel Deviation.** Indica la relación existente entre las aristas opuestas de un elemento rectangular. Un parallel deviation de 0 indicará un cuadrilátero perfecto, mientras que un mayor valor indicará que existe un par de lados con un gran ángulo entre ellos.
- **Skewness.** También llamada oblicuidad o asimetría, es uno de los parámetros más importantes para definir la calidad de malla, ya que muestra que tan lejos se encuentra un elemento de la forma ideal.
- **Orthogonal quality.** Se refiere a la relación que existe entre un vector perpendicular a la arista del elemento, el vector que une el centroide del elemento con la arista y el vector que une los centroides de dos elementos adyacentes.

Figure 56: Aspect Ratios for Triangles



Figura 1.24. Aspect ratio en triángulos [13].

Figure 58: Aspect Ratios for Quadrilaterals



Figura 1.25. Aspect ratio en cuadriláteros [13].

Figure 59: Jacobian Ratios for Triangles



Figure 60: Jacobian Ratios for Quadrilaterals

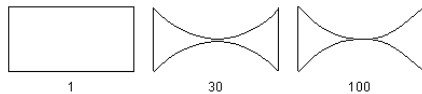


Figura 1.26. Jacobian ratios en triángulos y cuadriláteros [13].

Figure 67: Parallel Deviations for Quadrilaterals

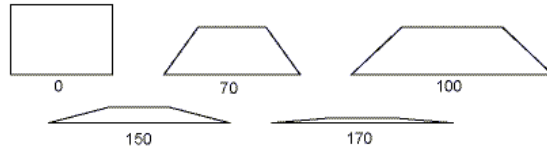
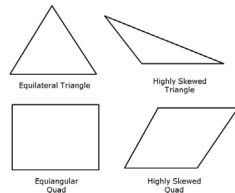


Figura 1.27. Parallel deviation en cuadriláteros [13].



The following table lists the range of skewness values and the corresponding cell quality.

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 - 1	bad (skewed)
0.75 - 0.9	poor
0.5 - 0.75	fair
0.25 - 0.5	good
>0 - 0.25	excellent
0	equilateral

Figura 1.28. Skewness en cuadriláteros y triángulos [13].

Figure 71: Vectors Used to Compute Orthogonal Quality for a Cell

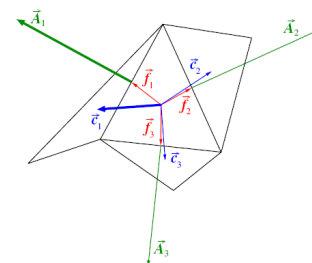


Figura 1.29. Vectores usados en el cálculo de orthogonal quality [13].

1.5.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde consisten en las condiciones y restricciones impuestas al modelo, así como las conexiones y contactos entre las diversas piezas en un ensamble. Al igual que el mallado, no imponer las condiciones de borde adecuadas afectará en gran manera la solución a pesar de tener una malla muy fina, debido a que el software resolverá un problema diferente al que se desea. Los principales tipos de condiciones de borde son las siguientes:

- Restricciones de movimiento. Se definen sobre los grados de libertad de un nodo, línea, cara o sólido, pueden restringir tanto los movimientos en los tres ejes (UX, UY, UZ) como las rotaciones respecto a los ejes (RotX, RotY, RotZ). Dependiendo a la necesidad se pueden limitar los grados de libertad a los que sean necesarios.
- Contacto entre sólidos. Existen diversas opciones de contacto entre dos cuerpos. Se puede definir que los cuerpos no posean movimiento relativo de ningún tipo entre ellos, posibilidad de deslizamiento con y sin posible separación, deslizamiento con y sin fricción, etc.
- Uniones entre cuerpos. Representan uniones entre cuerpos que limitan uno o más grados de libertad, es decir, limitan las posibilidades de movimiento relativo entre los cuerpos. Adicionalmente se pueden unir cuerpos con resortes y elementos *beam*.
- Cargas. Estas pueden tratarse de fuerzas puntuales, lineales, presiones aplicadas al modelo; pueden ser definidas o importadas de otros análisis; y pueden ser valores dependientes de otros parámetros, como posiciones, tiempo, etc.

1.5.4. Procesamiento

En esta etapa la computadora procede a resolver la matriz generada con todas las restricciones y cargas definidas. Adicionalmente, el programa ejecutará comandos asignados por el usuario. El tiempo de simulaciones puede variar dependiendo al número de elementos y presencia de no-linealidades, ya que se deberán emplear otros algoritmos para la resolución de las mismas. Las no linealidades se pueden dar

por distintos motivos, tanto por condiciones definidas por el usuario o por condiciones de contacto, activación de grandes deformaciones en los cuerpos, propiedades de material etc.

Para poder resolver problemas lineales el programa básicamente realiza una eliminación Gaussiana resolviendo y hallando los valores de desplazamientos del vector $\{u\}$ de la ecuación [14]:

$$[K]\{u\} = \{F\} \tag{1.19}$$

Dónde:

- $[K]$ es la matriz de rigidez total $\begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & \dots & K_{nm} \end{bmatrix}$
- $\{u\}$ es el vector de grados de libertad nodales $\{u\} = [u_1, \dots, u_n]^T$
- $\{F\}$ es el vector de fuerzas que consiste en la suma de vectores de fuerzas nodales aplicadas y reacciones nodales $\{F\} = \{F^a\} + \{F^r\}$

Y se pueden obtener los esfuerzos actuantes en el cuerpo a través de la ley de Hooke en un elemento finito como el que se muestra en la figura 1.29.

$$\{\sigma\} = [K]\{\varepsilon\} \tag{1.20}$$

Dónde:

- $\{\sigma\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}]^T$ es la matriz de esfuerzos de un elemento (figura 1.30). $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ son esfuerzos normales; y $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$, cortantes
- $\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}]^T$ es la matriz de deformaciones unitarias de un elemento (figura 1.30).

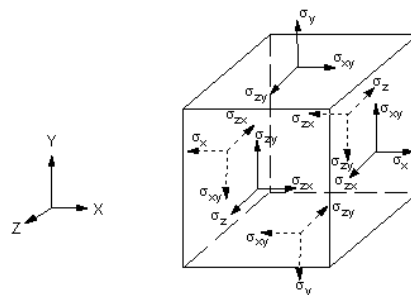


Figura 1.30. Tensor de esfuerzos, esfuerzos normales y cortantes [14].

Para la resolución de problemas no lineales, existen distintos métodos numéricos para resolverlos. Principalmente el software utiliza métodos modificados de gradientes conjugados y método de Newton-Raphson para encontrar valores que converjan en la solución. Este tipo de problemas requieren una cantidad mucho mayor de memoria y recursos computacionales, ya que se deben realizar iteraciones para llegar a la convergencia.

En el caso del análisis modal, el software posee diversos métodos para la obtención de valores y vectores propios, es decir las frecuencias naturales y modos de vibración, sin embargo, para los problemas que serán resueltos en la presente tesis el principal método de obtención de valores y vectores propios es un algoritmo llamado “Bloque Lanczos”, el cual está basado en el algoritmo de Lanczos (1893-1974) [14].

1.5.5. Post – procesamiento

Esta etapa consiste principalmente en la presentación gráfica de los resultados en la que se pueden graficar los resultados de esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, factores de seguridad etc. en un cuerpo en base a colores, se puede apreciar los modos de vibración en un ensayo modal o los factores multiplicadores de fuerza en ensayos de pandeo. En esta etapa también se realiza la validación de resultados; como mencionado anteriormente se necesitan valores referenciales para determinar si la simulación arrojó resultados exitosos o no, estos valores referenciales se obtienen de cálculos analíticos o también en la medida de lo posible de resultados experimentales.

CAPÍTULO 2

Estudio de componentes estructurales mediante métodos analíticos

2.1 Introducción

El diseño de los componentes siempre contempla cálculos analíticos y procedimientos según normativas y de esta manera se pueden tomar decisiones con respecto al diseño. Al variar las cargas consideradas, la geometría, entre otros factores, la complejidad de los problemas analíticos aumenta. Por lo tanto, mientras que el capítulo 3 se dedica netamente a la simulación numérica con la cual se obtienen los resultados de manera mucho más rápida, el presente capítulo 2 en paralelo trata, mediante un estudio analítico, de la obtención de esfuerzos a los cuales están sometidos los diversos componentes, para de esta manera obtener valores referenciales que serán comparados con los obtenidos mediante simulación.

2.2 Análisis de la torre

Sobre la torre actúan diversas cargas que fueron discutidas en el capítulo 1, como los pesos de los componentes, las cargas aerodinámicas asociadas al funcionamiento del aerogenerador, que se muestran en la tabla 1.4 del capítulo 1 y fueron obtenidas en un

análisis como se detalla en el anexo 2. Como se muestra en la figura 2.1, la torre se modela como una barra cilíndrica hueca deformable articulada en la base.

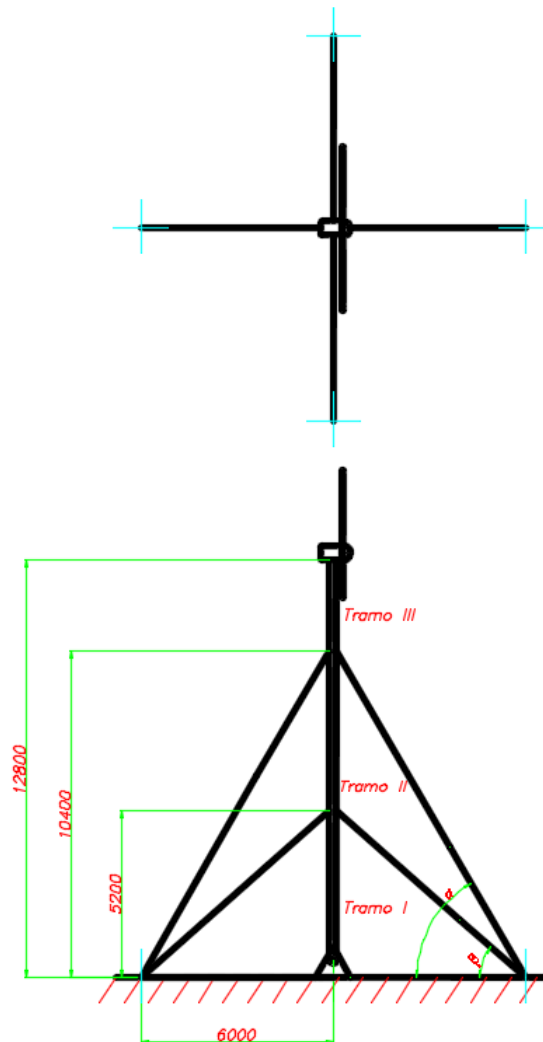


Figura 2.1. Modelo de la torre para cálculos, en la que se la modela como una barra cilíndrica hueca deformable. Los ángulos α y β valen 60° y 41.4° respectivamente y se forman con el cable y la horizontal.

Para la realización del cálculo se dividió la torre en tres tramos como se muestra en la figura 2.1, siendo los dos primeros de 5.2 metros y el tercero de 2.4 metros. Adicionalmente se modelaron los cables como resortes solo a tracción para poder representar su comportamiento. Todos los cables poseen la misma área transversal y son de acero, por lo que poseen el mismo módulo de elasticidad E .

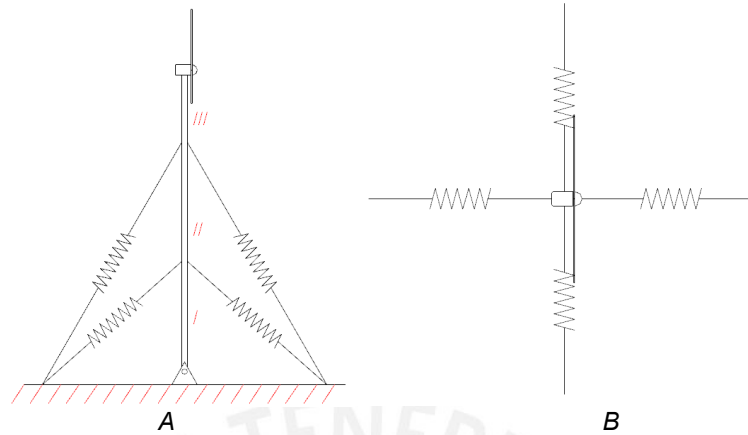


Figura 2.2 Los cables que se muestran en la figura 2.1 fueron reemplazados por resortes para los cálculos como se muestra en A de los cables se puede ver desde la vista superior B.

2.2.1 Cargas actuantes

El primer paso para el estudio es la identificación de las cargas que actúan sobre la torre del aerogenerador. Luego de un análisis de las fuerzas actuantes, se determinaron las fuerzas que se pueden apreciar en la figura 2.3. Cabe resaltar que no se consideró la carga del viento sobre la torre (su efecto será evaluado posteriormente).

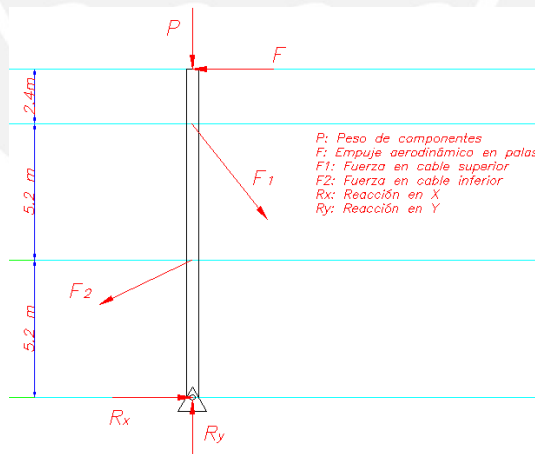


Figura 2.3: Diagrama cuerpo libre en la torre del aerogenerador. El peso equivale a 2000N y la fuerza de empuje a 1675N, las fuerzas $F1$ y $F2$ corresponden a las fuerzas resultantes en los cables superior e inferior respectivamente.

Para poder obtener los valores de las constantes de rigidez equivalente de los cables se utilizó las expresiones 2.1 y 2.2 de las cuales se deduce la expresión 2.3, siendo conocidas el área de la sección transversal A (cables de 3/16" de diámetro), el módulo de elasticidad E (para acero) y la longitud del cable que se puede deducir de la figura

2.1. De esta manera se obtuvieron las rigideces axiales de los cables, mostradas en la tabla 2.1.

$$\delta = \frac{FL}{EA} \tag{2.1}$$

$$k_{eq} = \frac{F}{\delta} \tag{2.2}$$

$$k_{eq} = \frac{EA}{L} \tag{2.3}$$

Tabla 2.1. Constantes de rigidez axial equivalente para cables.

	Longitud (m)	Rigidez equivalente (N/mm)
Cables superiores k_1	12	311.74
Cables inferiores k_2	7.88	471.21

A partir de las fuerzas descritas en la figura 2.2 se obtienen las reacciones en los apoyos. Se generan las siguientes ecuaciones correspondientes al equilibrio estático y las ecuaciones de momento flector (figura 2.3)

Ecuaciones de equilibrio estático

$$\Sigma F_x = 0: \quad F = F_1 \cos(\alpha) + F_2 \cos(\beta) + R_x$$

$$\Sigma F_y = 0: \quad R_y = F_1 \sin(\alpha) + F_2 \sin(\beta) + P$$

$$\Sigma M_{base} = 0: \quad PL\theta + FL = F_1 \cos(\alpha) L_1 + F_2 \cos(\beta) L_2$$

Descomposición de fuerzas en los cables.

$$F_1 = k_1 \delta_1, \quad F_2 = k_2 \delta_2, \quad f_1 = F_1 \cos(\alpha) \quad f_2 = F_2 \cos(\alpha)$$

Segundo teorema de Castigliano (expresión 1.8)

$$\delta_1 = \int_0^{12800} M \frac{\partial M}{\partial f_1} \frac{dx}{EI}, \quad \delta_2 = \int_0^{12800} M \frac{\partial M}{\partial f_2} \frac{dx}{EI}$$

Que usa la función de momento flector M mostrada a continuación

$$M = \begin{cases} (f_1 - F - f_2)x \\ (f_1 - F)(x - 10400) + 2400F, & 5200 < x < 10400 \\ -F(x - 10400) + 2400F, & x > 10400 \end{cases}$$

Derivadas de momentos flectores con respecto a las fuerzas.

$$\frac{\partial M}{\partial F_1} = \begin{cases} x - 10400 & , \quad 5200 < x < 10400 \\ 0 & , \quad x > 10.4 \end{cases}$$

$$\frac{\partial M}{\partial F_2} = \begin{cases} -x & , \quad x < 5200 \\ 0 & , \quad 5200 < x < 10400 \\ 0 & , \quad x > 10.4 \end{cases}$$

Los datos para las ecuaciones anteriormente mostradas se resumen en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Datos conocidos de la torre.

Fuerza de empuje F	1675 N
Peso de aerogenerador P	2000 N
Ángulo de cable superior con horizontal α	60°
Ángulo de cable inferior con horizontal β	41.37°
Longitud de la base al cable inferior L_2	5.2 m
Longitud de la base al cable superior L_1	10.4 m
Longitud total de la torre L	12.8 m

De las ecuaciones presentadas anteriormente se procedió a resolver utilizando los datos mostrados en la tabla 2.2 y se obtuvieron los siguientes resultados, con los cuales se obtuvo los diagramas de fuerzas internas finales (figura 2.4), las reacciones en los apoyos y las fuerzas en los cables.

Tabla 2.3. Resultados de reacciones y fuerzas

Reacción en eje X R_x	-29.09 N
Reacción en eje Y R_y	8290.9 N
Ángulo de giro de la torre θ	5.65°
Fuerza en cable superior F_1	5925.3N
Fuerza en cable inferior F_2	1753.59 N

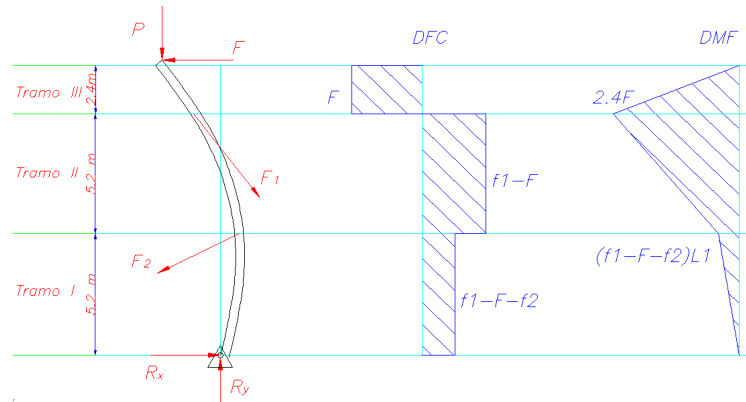


Figura 2.4: Diagrama de fuerzas internas de la torre, con la correspondiente deformación.

2.2.2 Determinación de esfuerzos

Una vez obtenidas las fuerzas que actúan en la torre, se procedió a realizar los cálculos de esfuerzos a los que está sometida.

Se realizó el análisis del tramo III de 2.4 metros (figura 2.4). Al realizarse solo el diagrama de cuerpo libre de dicho tramo (figura 2.5) se logra obtener un momento flector como se aprecia en la expresión 2.4

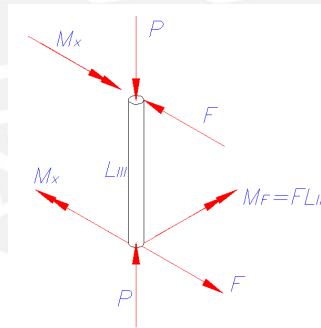


Figura 2.5. Diagrama de fuerzas en el tercer segmento (superior) de la torre.

$$M_f = \sqrt{(FL_{III})^2 + Mx^2} = \sqrt{(1675 * 2.4)^2 + 275^2} = 4029.4 Nm \quad (2.4)$$

Una vez determinado el momento flector resultante, se procedió a realizar el cálculo del esfuerzo normal, que se origina por el momento flector y la fuerza axial, para lo cual se utilizó la expresión 2.5. Los valores del momento de inercia I y el área transversal A están calculados a detalle en el anexo 3.

$$\sigma_N = \frac{M_f * y}{I} + \frac{P}{A} = \frac{4029395 * 57}{2324061.45} + \frac{2000}{1548.01} = 100.117 MPa \quad (2.5)$$

2.2.3 Verificación de estabilidad: pandeo

Al tratarse de un elemento esbelto sometido a una carga axial de compresión, la torre debe ser capaz de soportar dicha carga sin presentar problemas de estabilidad. Dado que se trata de un elemento compuesto y que los cables aportan con rigidez transversal a lo largo de la torre, se realizó el cálculo para cada uno de los tramos mostrados en las figuras 2.1 y 2.4.

De acuerdo a lo que se menciona con anterioridad, se utilizará el método de Euler para verificar la estabilidad; para ello se requiere determinar el factor de esbeltez λ del tramo a analizar, el cual depende de su longitud equivalente L_p y el radio de giro de la sección i (el cual se encuentra en el Anexo 3). El análisis para los segmentos I y II fue igual ya que se consideró a ambos segmentos articulados en los extremos, sin embargo, esta suposición es netamente para el cálculo, ya que en realidad existen desplazamientos en cada extremo de cada tramo. Para el caso del tramo III se consideró que se encuentra libre en el extremo superior, por lo que su longitud equivalente será el doble de la real. En la tabla 2.4 se muestran los factores de esbeltez para los tres tramos. De la expresión 1.9 se obtienen los factores de esbeltez como se muestra en la tabla 2.4.

$$\lambda = \frac{L_p}{i} = \frac{1 * 5.2m}{0.03874} = 134.228 = 135$$

Tabla 2.4.
Factores de esbeltez

Tramo I: λ_I	135
Tramo II: λ_{II}	135
Tramo III: λ_{III}	270

Dado que el factor de esbeltez en los tres casos es mayor que 100, se puede asumir que los tres se encuentran en el rango de Euler, por lo tanto la expresión 1.11 tiene efecto y se puede encontrar la fuerza crítica de pandeo.

$$F_p = \frac{\pi^2 EI}{L_p^2} = \frac{\pi^2 * 2.1 * 10^5 * 2324061.45}{5200^2} = 178139.38N$$

Para poder realizar las comparaciones con los resultados de simulación numérica, se determina el factor multiplicador de fuerza MF , el cual se obtiene dividiendo la fuerza de pandeo crítica entre la fuerza actuante.

Tabla 2.5.
Resultados de fuerzas críticas de pandeo

	λ	L_p	F_p	F_a	MF
Tramo I:	135	5.2 m	178139 N	8290 N	21.488
Tramo II:	135	5.2 m	178139 N	7131 N	24.981
Tramo III:	270	4.8 m	209066 N	2000 N	104.533

De acuerdo con los resultados obtenidos, que la fuerza actuante debe ser incrementada 21.5 veces para alcanzar la fuerza crítica de pandeo, y de ocurrir la estructura fallaría por estabilidad.

2.2.4 Determinación de frecuencias naturales

Al tratarse de un sistema conformado por una masa (masa de la torre y aerogenerador) y de distintas (rigidez de la torre y de los cables), fue necesario conocer las características vibratorias de la torre, ya que si la turbina presentara un desbalance o se diera una carga alternante podría existir un riesgo a la integridad de la estructura en caso su frecuencia de la carga fuera cercana a la frecuencia natural de la torre, como lo muestra la figura 2.6, en la cual se ve como la amplitud aumenta de manera exponencial al acercarse a la resonancia, es decir, que las dos frecuencias coincidan.

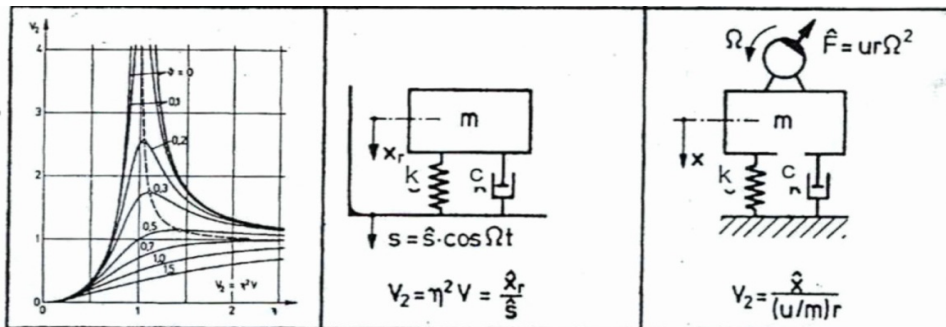
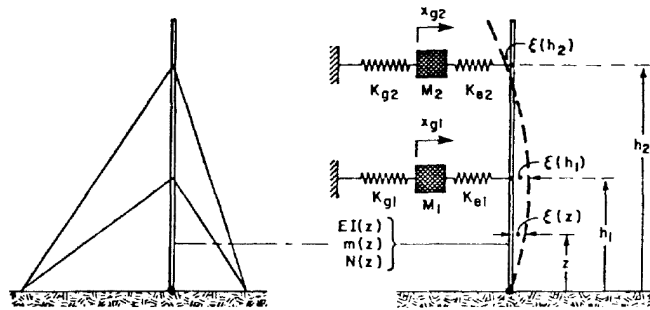


Figura 2.6. Función de amplificación para un sistema vibratorio de un grado de libertad con carga desbalanceada. [15].

Para el análisis de la torre se planteó modelar la torre como un sistema de un grado de libertad con masa de los cables despreciable (ya que es muy pequeña en comparación con la masa de la torre y del aerogenerador), con un modelo similar al de la figura 2.7.



B

Figura 2.7. Modelo de la torre con templadores y a la derecha sistema vibratorio equivalente. [16].

Primer modelo para la obtención de la frecuencia natural (movimiento cuerpo rígido)

Una primera aproximación considera a la torre como un sólido no deformable y a los cables como resortes, la rigidez de estos resortes se puede obtener descomponiendo la fuerza del cable en sus componentes vertical y horizontal, para efectos de este análisis se despreció la influencia de la componente vertical de los cables. Para la rigidez equivalente horizontal, se usaron los resultados de las rigideces encontradas con la expresión 2.3 y en la tabla 2.1, los ángulos α y β se muestran en la figura 2.1

$$k_a = k_1 * \cos(\alpha) \tag{2.6}$$

$$k_b = k_2 * \cos(\beta) \tag{2.7}$$

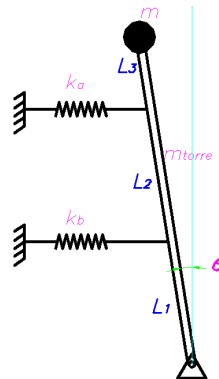


Figura 2.8 Modelo de un grado de libertad para la torre.

Del diagrama de cuerpo libre del modelo se pudo generar la ecuación de movimiento dependiente del ángulo θ como se ilustra en la figura 2.7, y de esta forma se generó un sistema equivalente como el que se muestra en la figura 1.15 del cual se obtuvo la ecuación de movimiento como se muestra a continuación, la cual resulta ser la ecuación 1.12 y la frecuencia natural se obtiene según la expresión 1.13. Las masas consideradas son de 200kg para el aerogenerador y 170kg para la torre.

$$-\frac{k_1\theta L_1}{\cos(\alpha)} - \frac{k_2\theta L_2}{\cos(\beta)} + PL\theta = (m_{Turbina}L^2 + \frac{m_{Torre}L^2}{3})\ddot{\theta}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\frac{k_1L_1}{\cos(\alpha)} + \frac{k_2L_2}{\cos(\beta)}}{(m_{Turbina}L^2 + \frac{m_{Torre}L^2}{3})}} = 15.22 \frac{rad}{s} = 2.42 \text{ Hz}$$

Segundo modelo para la obtención de frecuencias naturales considerando deflexión.

Una aproximación más cercana a la realidad es modelar a la torre como un sólido deformable por lo que se debe considerar su rigidez, y que además cierto porcentaje de su masa también participa en la vibración.

Los modos de vibración se obtuvieron para dos planos perpendiculares entre sí, en los cuales se encuentran los cables. Las masas participantes se consideraron como la masa total del tramo III (figura 2.1), con un total de 31.875 kg. Para determinar la rigidez se utilizó la expresión 2.2, ya que con los resultados anteriores se sabe que para una fuerza de 1675N existe un desplazamiento de aproximadamente 100mm.

Cabe resaltar que solo se considera la vibración en el sentido transversal al eje de la torre, debido a que las vibraciones que corresponden al sentido axial de la torre y torsionales requieren mucha energía y tienen muy poca probabilidad de ocurrir en las condiciones actuales.

Tabla 2.6. Frecuencias naturales de la torre para cada modo de vibración

	Masa equivalente (kg)	Rigidez equivalente (N/mm)	Frecuencia natural (Hz)
Modo 1	231.875 kg	16.62 N/mm	1.3475 Hz
Modo	231.875 kg	16.62 N/mm	1.3475 Hz

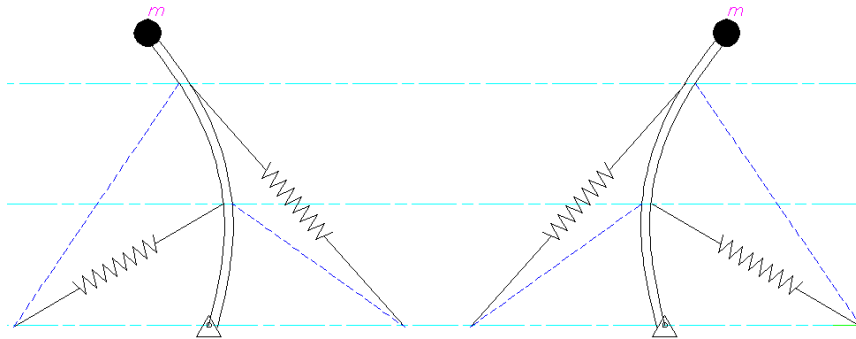


Figura 2.9. Modo de vibración correspondientes a las frecuencias naturales obtenidas en la tabla 2.6, correspondiente a 1.35Hz. Se muestran las posiciones de amplitud máxima y en líneas punteadas los cables que no están trabajando en cada posición.

Para poder conocer el comportamiento de los cables y los modos de vibración que originan se pueden plantear ecuaciones de movimiento en base a la figura 2.7 considerando la masa de los cables dentro del análisis. De esta manera se puede generar un sistema de tres grados de libertad (hasta de 10 considerando todos los movimientos) y obtener los vectores y valores propios para el comportamiento de los cables y estructura.

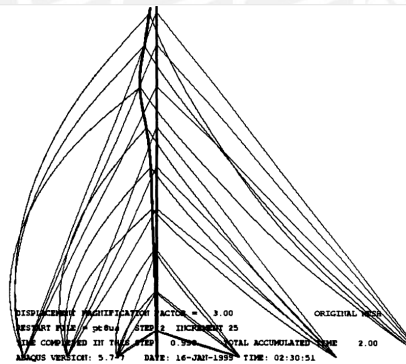


Figure 6-21. Failure Shape as Predicted by the Finite Element Model for Prototype Tower PVIII

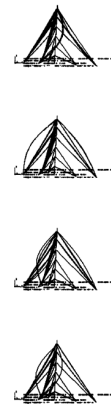


Figure 6-23. First Twenty Mode Shapes of Prototype Tower PV Modes (1-4)

Figura 2.9. Modos de vibración en una torre de comunicaciones arriostrada al piso con cables. [17].

Además en el caso de que uno de los cables pierda el tensado total o parcialmente se puede darse cualquiera de los siguientes casos:

- Si el cable está funcionando, es decir, está tensionado por las cargas de funcionamiento, este perderá parte de su rigidez y se darán desplazamientos

mayores en la torre, adicionalmente, el valor de las frecuencias naturales descenderá, así como reducirá la fuerza crítica de pandeo.

- Si el cable no está trabajando, el sistema no notará la diferencia inmediatamente, sin embargo también bajarán las frecuencias naturales de los modos con amplitudes en el plano del cable, así como la fuerza crítica de pandeo.

En el caso de que alguno de los cables que se encuentra trabajando sea cortado o se rompa, entonces se dará un desequilibrio en la torre, a partir del cual se dará una oscilación y comportamiento muy complejo como para ser resuelto analíticamente.

2.2.5 Determinación de esfuerzos en el izaje.

Para la validación se tomó como referencia la variante sin el cable superior auxiliar. El peso de la turbina y demás componentes genera un momento flector en la unión de los tramos II y III de manera que se genera un esfuerzo normal por momento flector en la sección del primer cable. Se ignoraron los efectos de la fuerza cortante al ser la longitud de la torre mucho más grande que su diámetro.

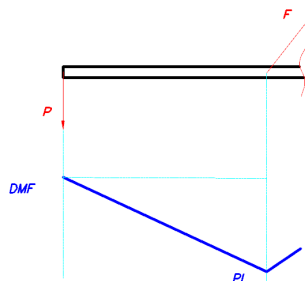


Figura 2.10. Parte del diagrama de momentos flectores de la torre al izaje, mostrando el valor máximo

Se tiene un momento flector de:

$$M_f = FL = 1800 \cdot 2.4 = 3960 Nm$$

El valor del esfuerzo por este momento flector:

$$\sigma = \frac{M_f \cdot y}{I} = 97.12 MPa$$

2.3 Análisis del eje principal

Un elemento de vital importancia para el aerogenerador es el denominado eje principal, debido a que este elemento soporta al rotor y las palas, así como el generador.

2.3.1 Cargas actuantes

Al igual que en la sección 2.2, se tienen que definir las cargas que actuarán sobre el eje principal, el cual se modeló como una viga empotrada en un extremo. Utilizando los datos de fuerzas proporcionados por la empresa Waira (Anexo 1) y las cargas obtenidas por una simulación CFX. Con las cargas y la geometría definida del eje principal, se pudo graficar el diagrama de cuerpo libre para el eje principal como se ilustra en la figura 2.11.

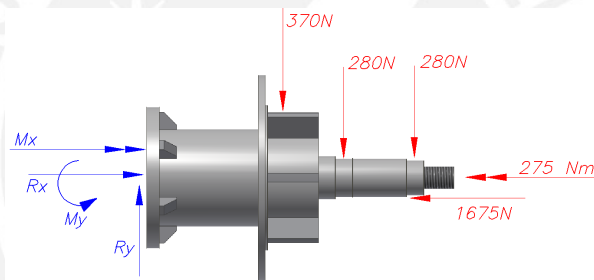


Figura 2.11. Diagrama de cuerpo libre de eje principal. En rojo se grafican las cargas aplicadas y en azul las reacciones en el empotramiento.

De la figura 2.11 se pudo resolver las ecuaciones de equilibrio para poder obtener las reacciones en los apoyos, obteniéndose los siguientes valores $R_x=1675N$, $R_y=930N$, $M_x=275000Nmm$, $M_y=102985Nmm$, de donde se pudo graficar los diagramas de fuerzas internas y diagramas de momento flector.

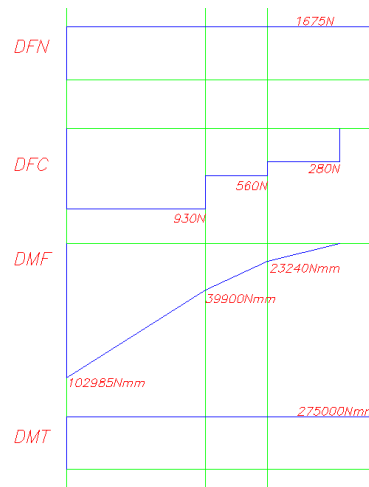


Figura 2.12: Diagramas de fuerzas internas en el eje principal. Según la figura 2.9.

2.3.2 Determinación de esfuerzos y deformaciones

Una vez obtenidos los diagramas de fuerzas internas y reacciones en el apoyo, se procedió a calcular los esfuerzos en ciertos puntos del eje principal, una vez hallados los esfuerzos se calculó el esfuerzo equivalente en cada uno de estos puntos según la teoría de máxima energía de distorsión.

Se estableció los puntos donde sería conveniente conocer los esfuerzos y deformaciones para tener valores de comparación.

- Esfuerzos en el empotramiento.

Para este cálculo se usaron las expresiones de esfuerzo normal por momento flector, esfuerzo normal por fuerza axial y esfuerzo cortante por momento torsor, estos esfuerzos se calcularon en la parte inferior de la sección transversal.

$$\sigma_N = \sigma_f + \sigma_n = \frac{M_f * y}{I} + \frac{F}{A} = 5.3939$$

$$\tau = \frac{M_t * y}{I_o} = 5.5689$$

No se consideró el efecto del esfuerzo cortante por fuerza cortante debido a que su distribución de esfuerzos es máxima en el centro y nula en los extremos. Una vez obtenidos los valores de esfuerzo normal y cortante se procedió a calcular el esfuerzo equivalente por teoría de máxima energía de distorsión.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_N^2 + 3\tau^2} = 11.05MPa$$

Otra sección de interés es la zona donde se apoya un rodamiento cónico del eje principal (donde se aplica la segunda carga de 280N), se realizó el análisis de esta zona, utilizando los valores de fuerzas obtenidos de los diagramas de fuerzas internas obteniéndose los siguientes esfuerzos.

$$\sigma_N = \sigma_f + \sigma_n = \frac{M_f * y}{I} + \frac{F}{A} = 3.6509 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{M_t * y}{I_o} = 15.369 \text{ MPa}$$

Sin embargo, estos son los esfuerzos nominales y están afectados por un concentrador de esfuerzos, para el cálculo se considerará solo el efecto del factor de concentrador de esfuerzos geométrico ya que el concentrador de esfuerzos efectivo se utiliza cuando existen cargas alternantes.

$$\alpha_f = 1.18, \quad \alpha_a = 1.75, \quad \alpha_t = 1.41$$

$$\sigma'_N = 4.908$$

$$\tau' = 21.67$$

El esfuerzo equivalente estará dado por la expresión 1.18:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_N'^2 + 3\tau'^2} = 37.85 \text{ MPa}$$

El valor de este esfuerzo aún debe ser corregido, debido a que el factor de concentración de esfuerzos utilizado es geométrico, y para obtener los factores efectivos se deben realizar estudios de deformación plástica.

2.4 Análisis de la cola

2.4.1 Cargas actuantes

Para el caso de la cola se considera que solo actúa el peso propio de la cola, se la modeló como una viga empotrada bajo su propio peso, el diagrama de fuerzas internas se puede apreciar en la figura 2.13.

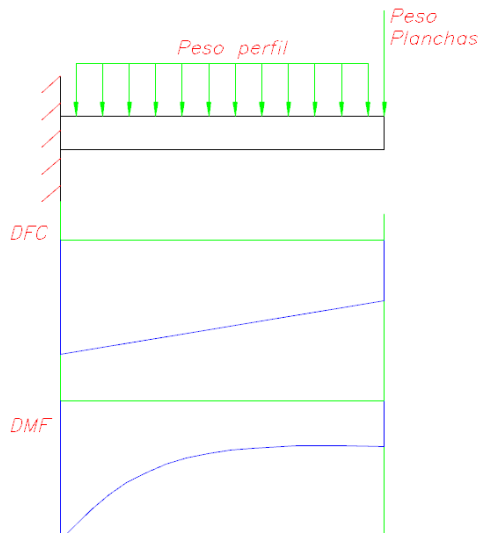


Figura 2.13. Fuerzas actuantes en la cola y diagramas de fuerzas internas.

2.4.2 Determinación de esfuerzos

De los diagramas se obtiene que el momento flector máximo en esta zona es de 517210 N.mm. y la inercia de la sección transversal tiene un valor de 172723.456 mm⁴. Con estos datos se obtiene el esfuerzo por momento flector según la expresión 2.5.

$$\sigma = \frac{517210 * 25}{172723.456} = 74.861 \text{ MPa}$$

Sin embargo, cabe destacar que la zona cercana al soporte se encuentra reforzada con placas de acero, las cuales elevan el momento de inercia, reduciendo de esta manera el valor de esfuerzo normal por momento flector.



CAPÍTULO 3 Simulación Numérica

3.1 Introducción

La simulación numérica por el método de elementos finitos es una técnica computacional que permite determinar los esfuerzos y deformaciones de un componente o ensamble determinado, a partir del material, las condiciones y cargas impuestas. Típicamente los análisis por elementos finitos están compuestos por tres etapas:

- ❖ Etapa de pre – procesamiento: En esta etapa se desarrollan los modelos geométricos los cuales son mallados o discretizados en elementos finitos para su análisis. Además se definen el material, las cargas aplicadas, condiciones de borde (apoyos).
- ❖ Etapa de procesamiento: En esta etapa con ayuda de un software de elementos finitos, se determinan los esfuerzos y deformaciones en base a la teoría explicada en el capítulo 1. El tiempo de las simulaciones puede variar en gran magnitud dependiendo de las condiciones impuestas en el pre – procesamiento, cantidad de elementos finitos, y si se trata o no de un análisis lineal. Los análisis que se pueden realizar mediante simulación numérica son estáticos

estructurales, de pandeo lineal, análisis modal, etc. Terminando el procesamiento se obtienen los resultados para cada uno de los elementos.

- ❖ Etapa de post – procesamiento: En esta etapa se visualizan gráficamente los resultados obtenidos en la etapa anterior, utilizando típicamente diversos colores para mostrar las distribuciones de esfuerzos, deformaciones etc.

Cabe señalar que los modelos geométricos del aerogenerador se desarrollaron en el software CAD (diseño asistido por computadora por sus siglas en inglés) en base a los planos proporcionados por la empresa Waira y en base a mediciones realizadas directamente en los componentes durante una visita a la empresa. El material definido para todas las simulaciones se encuentra detallado en el anexo 4.

3.2 Simulación de modelo lineal de la torre

El modelo lineal consiste en una simplificación de la geometría de la torre, con la finalidad de realizar una simulación rápida que no represente un gran gasto computacional. Este modelo permite obtener, de forma ágil, no solo los esfuerzos y deformaciones, sino también los modos de vibración, pandeo y en general el comportamiento general de la torre. Todos los resultados fueron validados.

3.2.1 Etapa de pre – procesamiento

3.2.1.1 Definición de geometría

El modelo lineal consta de un elemento lineal con sección transversal equivalente a la de los tubos que conforman la torre del aerogenerador. El diámetro es de 114 mm y la altura de 12.8 metros. Los cables que unen la torre al suelo se modelan como resortes con valores de rigidez equivalente a las de los cables como se aprecia en la tabla 2.1. Se empleó un resorte en la parte superior para representar el comportamiento de ambos cables solo en tracción.

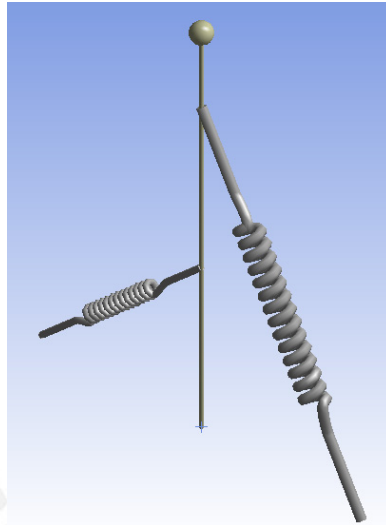


Figura 3.1 Modelo geométrico lineal de la torre.

3.2.1.2 Discretización

Una vez desarrollado el modelo geométrico, se realizó el mallado del modelo, dada la simplicidad del modelo, la malla consiste en elementos lineales como se aprecia en la figura 3.2.

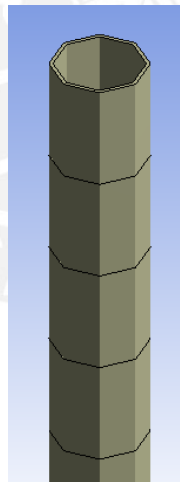


Figura 3.2. Detalle de malla de modelo lineal

La malla obtenida tiene las siguientes características (tabla 3.1)

Tabla 3.1. Número de elementos de malla usada en el modelo lineal.

Cantidad de nodos	203
Cantidad de elementos	101

3.2.1.3 Condiciones de borde

Las restricciones aplicadas al modelo lineal son las siguientes:

- ❖ Rotación en los ejes X, Y se encuentran restringidos, así como los desplazamientos en X, Y, Z (figura 3.3).
- ❖ Desplazamiento restringido en la base de los cables, pero tienen la capacidad de rotar en cualquier dirección. Representa la unión de los cables a tierra.

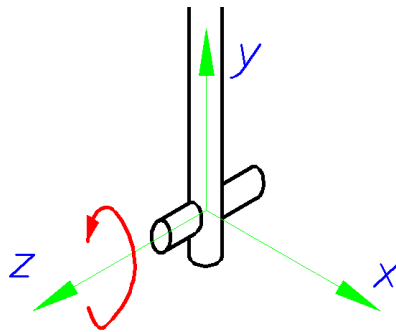


Figura 3.3. Detalle de las condiciones en la base del aerogenerador, la flecha roja indica el único grado de libertad, rotación alrededor del eje Z.

Cargas aplicadas:

- ❖ Carga producida por el peso del aerogenerador, que equivale a 2000N, se aplica en la parte superior, y se representa como una esfera gris en la figura 3.1.
- ❖ Empuje aerodinámico sobre las palas por el funcionamiento del aerogenerador, que equivale a 1675N. Obtenido de la simulación de las palas del aerogenerador (ver anexo 2).
- ❖ Momento resultante generado por el viento responsable del giro de las palas, equivalente a 275Nm. Obtenido de la simulación de las palas del aerogenerador (ver anexo 2).
- ❖ Peso propio de la estructura

3.2.2 Etapa de procesamiento

Dada la baja cantidad de elementos existe un gran ahorro computacional. En total se realizaron tres simulaciones, siendo estas un estático estructural, un análisis modal y un análisis de pandeo.

3.2.3 Etapa de post – procesamiento

El análisis estático estructural tiene como resultados esfuerzos y deformaciones. En la figura 3.4 se ilustran los desplazamientos de la torre, alcanzándose el máximo valor en la punta con 111mm, similar a los resultados en la figura 2.4

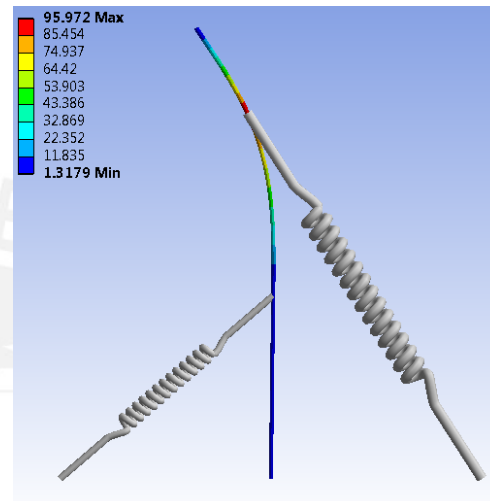
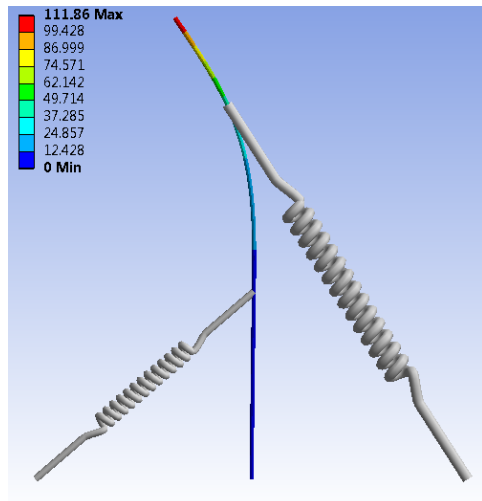


Figura 3.4. Desplazamientos en modelo lineal Figura 3.5. Esfuerzos máximos en modelo

Así también, en la figura 3.5, se muestran los esfuerzos principales máximos en la torre, siendo el máximo de 95.97 MPa, tal como se predijo en el capítulo 2.

En la figura 3.6 se puede apreciar el factor multiplicador de fuerza de para el análisis de pandeo, donde el factor por el cual se debe multiplicar la fuerza actuante para llegar a la carga crítica de pandeo, es de 18.038.

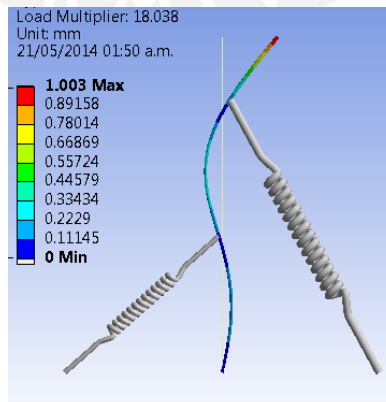


Figura 3.6. Resultados del análisis de pandeo (Deformación fuera de la escala real).

Por último, como se explicó con anterioridad, es necesario conocer las características vibratorias de la estructura, por lo que se realizó un análisis modal utilizando elementos finitos. En la tabla 3.2 se muestran las frecuencias naturales de la torre.

Tabla 3.2. Frecuencias naturales de la torre en el modelo lineal.

Modo 1	1.6071 Hz
Modo 2	1.6076 Hz
Modo 3	9.329 Hz
Modo 4	9.547 Hz
Modo 5	11.97 Hz
Modo 6	16.41 Hz
Modo 7	21.087 Hz

En la figura 3.7 se muestra el primer modo de vibración correspondiente a 1.61Hz, este modo tiene una gran similitud con el primer modo hallado en el capítulo 2, como se muestra en la figura 2.9.

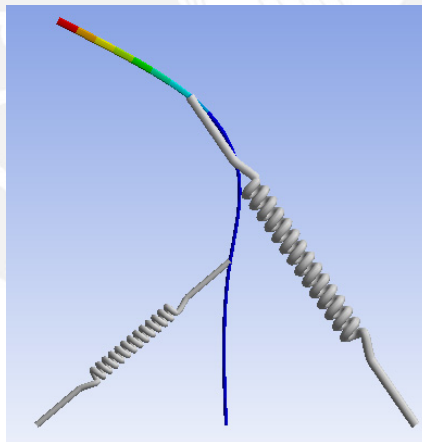


Figura 3.7. Primer modo de vibración obtenido por simulación, correspondiente a 1.607 Hz.

3.3 Simulación de modelo sólido de la torre

Una vez obtenidos los resultados de la simulación del modelo lineal de la torre, se procedió a realizar una simulación con el modelo sólido desarrollado en Autodesk Inventor. Esta simulación corresponde al modelo validado con los cálculos analíticos, una vez realizada la validación se procedió a realizar simulaciones con distintas condiciones de carga.

3.3.1 Etapa de pre – procesamiento

3.3.1.1 Definición de geometría

Para esta simulación el primer paso fue el desarrollo de modelos geométricos de la torre, a partir de los planos proporcionados por la empresa Waira, la cual está compuesta por 4 tubos de acero de 114 mm de diámetro exterior y 3200 mm de longitud la cual se encuentra articulada en la base y sujeta a tierra por dos juegos de cables tensores, de 3/16” de diámetro. El modelo se desarrolló a partir de la figura 3.8.

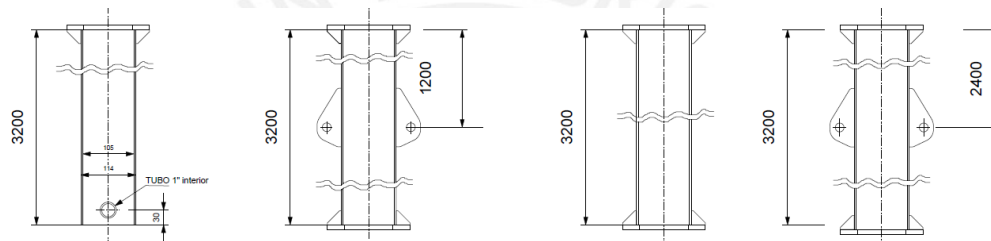


Figura 3.8. Modelo geométrico de la torre, por partes y ensamblada.

La figura 3.9 muestra las líneas (azul oscuro) que representan los cables tensores mencionados con anterioridad, se los modeló como líneas que posteriormente se configurarán para trabajar solo a tracción.

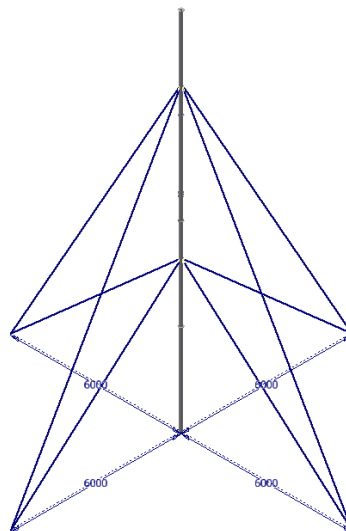


Figura 3.9. Ensamble de la torre con los cables.

3.3.1.2 Discretización

Una vez obtenido el modelo geométrico se procedió a generar una malla para el mismo modelo, es decir discretizar el modelo en elementos finitos. Dado que existen curvaturas y varios cambios de sección se decidió afinar la malla en estas zonas, mientras que en otras, donde la geometría es “plana” se usaron elementos de mayor tamaño. Los cables se mallaron de tal manera que solo existiera un elemento finito en toda su longitud, el cual se programó para funcionar solo a tracción, por lo que se cambió el tipo de elemento finito que se usa en ellos (detalle en anexo 5).

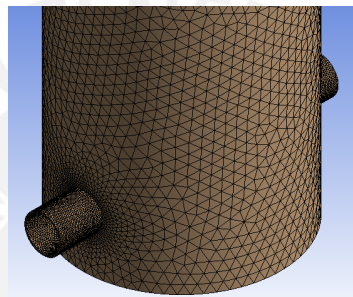


Figura 3.10. Malla afinada en la base de la torre, la cual va articulada a la base.

Las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 muestran la malla en distintas partes del modelo.

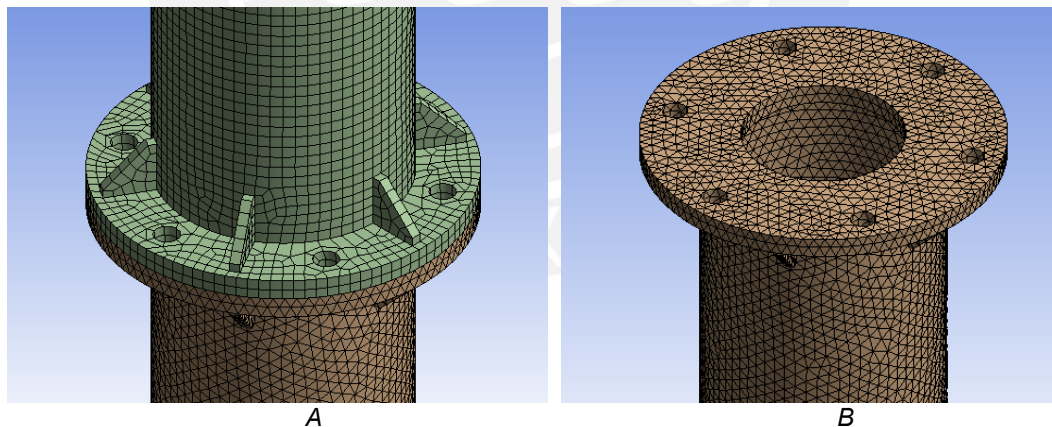


Figura 3.11. Malla en la unión con bridas del primer y segundo tramo. A) Malla en la unión y nervios. B) Malla de la cara de la brida del primer tramo

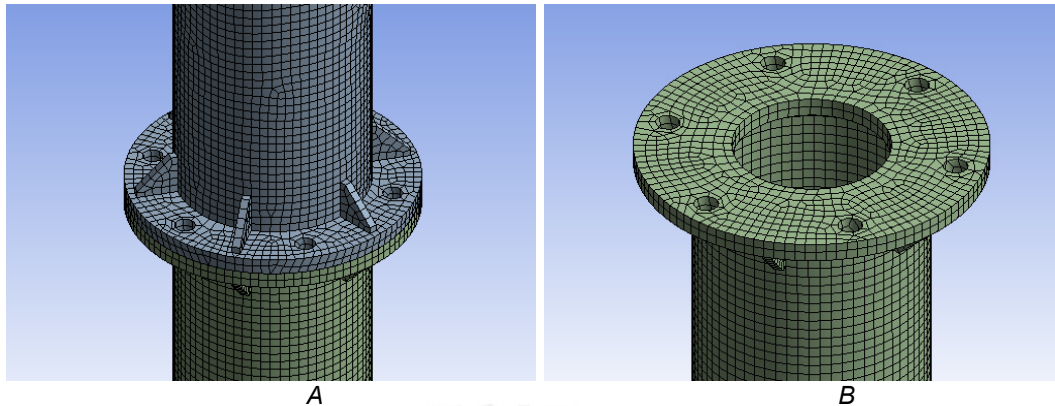


Figura 3.12. Malla en la unión con bridas del segundo y tercer tramo. A) Malla en la unión y nervios. B) Malla de la cara de la brida del segundo tramo. La malla en la unión del tercer y cuarto tramo es muy semejante a la mostrada.

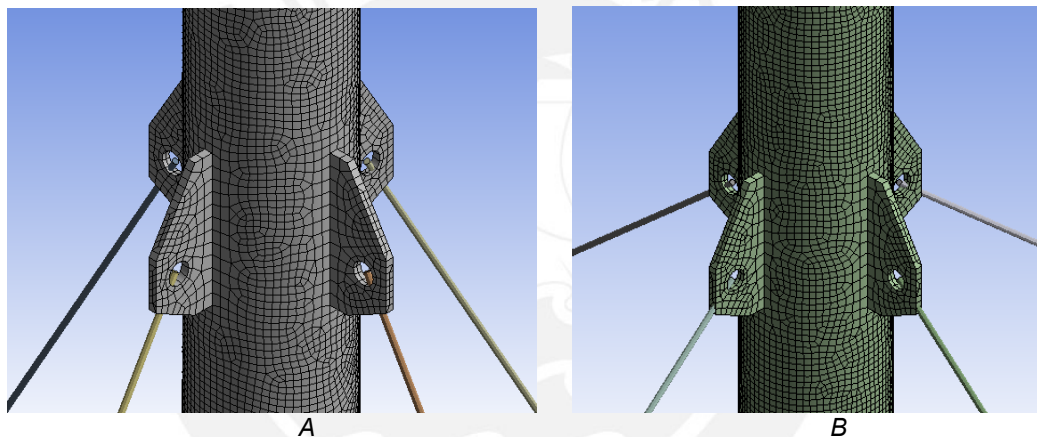


Figura 3.13. Malla de orejas y cables pertenecientes a: A) Cables superiores. B) Cables inferiores. Todo el cable es un solo elemento finito.

La malla del modelo, posee las siguientes características (tabla 3.3) y según lo detallado en el capítulo 1 (acápito 1.5.2) se aprecia que los parámetros más importantes como *element quality*, *orthogonal quality* y *skewness* se encuentran en valores aceptables. Los parámetros como *aspect ratio* poseen un valor alto dado que existen elementos largos a lo largo de la torre lo que origina que el promedio sea alto.

Tabla 3.3. Características de la malla empleada

Parámetro \ Malla	Valor promedio del parámetro
Número de nodos	1635467
Número de elementos	551054
<i>Element Quality</i>	0.7591
<i>Aspect Ratio</i>	119.0101

<i>Jacobian Ratio</i>	2.53765
<i>Skewness</i>	0.33187
<i>Orthogonal quality</i>	0.7556

3.3.1.3 Condiciones de borde

Una vez definida la malla se colocaron condiciones de borde para el análisis, es decir, condiciones de carga y restricciones del modelo, listadas a continuación y mostradas en la figura 3.14. Las restricciones son las siguientes:

- ❖ Apoyo cilíndrico en la base de la torre, con rotación libre en el eje Z, mientras todos las demás opciones de movimiento están restringidas. Representará la articulación de la base (figura 3.3), corresponde a “A” en la figura 3.14
- ❖ Desplazamiento restringido en la base de los cables. Representa la unión de los cables a tierra, corresponde a la selección “B” en la figura 3.14.

Las cargas aplicadas al modelo son las siguientes:

- ❖ Carga producida por el peso del aerogenerador, que equivale a 2000N, se aplica en la parte superior, y se representa como una componente de la carga D en la imagen 3.14.
- ❖ Empuje aerodinámico sobre las palas por el funcionamiento del aerogenerador, que equivale a 1675N. Obtenido de la simulación de las palas del aerogenerador (ver anexo 2).
- ❖ Momento resultante generado por el viento responsable del giro de las palas, equivalente a 275Nm. Obtenido de la simulación de las palas del aerogenerador (ver anexo 2).
- ❖ Peso propio de la estructura

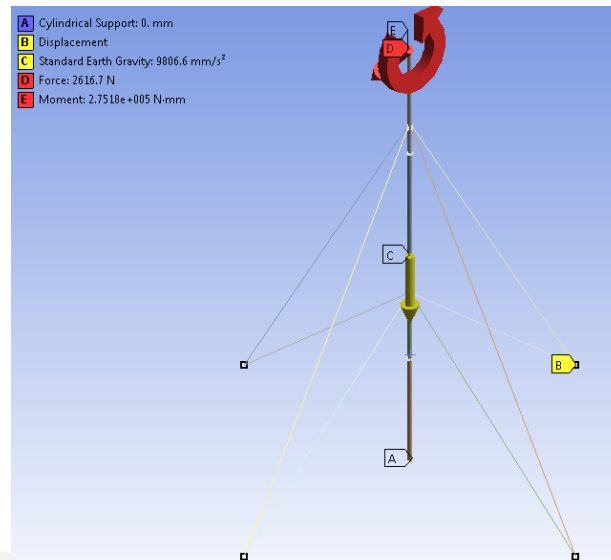


Figura 3.14. Condiciones de borde aplicadas al modelo.

Una vez definida la geometría, la malla y las condiciones de contorno se finaliza la etapa de pre – procesamiento y se procedió a la siguiente etapa, la cual es de solución.

3.3.2 Etapa de procesamiento

El tiempo de simulación para este modelo es mucho más alto que el del modelo lineal, principalmente por la abismal diferencia entre número de elementos y la presencia de no linealidades en el modelo sólido, las cuales fueron impuestas al activar la posibilidad de que se den grandes deformaciones en la simulación,

3.3.3 Etapa de post – procesamiento

Al haber concluido la etapa de procesamiento, se pueden mostrar de manera gráfica una variedad de resultados, de especial importancia son los resultados de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y factores de seguridad.

Para la base de la torre, se encontraron esfuerzos equivalentes (por von Mises) como se muestran en la figura 3.15, donde el esfuerzo más alto alcanza un máximo de 45 MPa

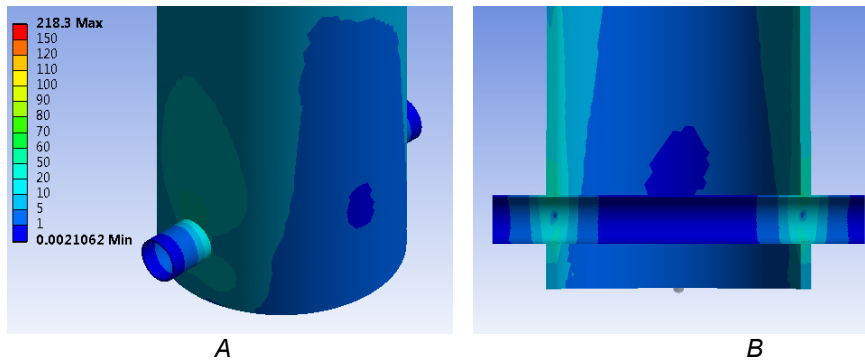


Figura 3.15. Distribución de esfuerzos (MPa) en la base de la torre. A) Exterior B) Interior.

De la misma manera, en las uniones bridadas se pudo graficar el esfuerzo, en el caso de las bridas inferiores (figura 3.16) los esfuerzos máximos no superan los 10 MPa, mientras que en las bridas superiores (figura 3.17) se alcanzan valores de 120 MPa en las zonas amarillas mostradas en la punta de los nervios.

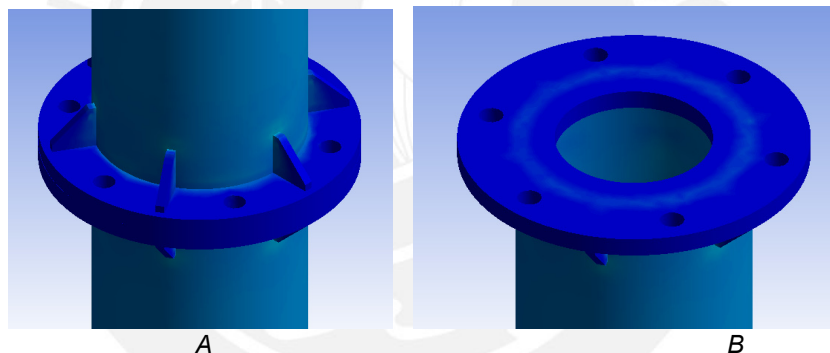


Figura 3.16. Distribución de esfuerzos en las bridas de la unión del primer y segundo segmento

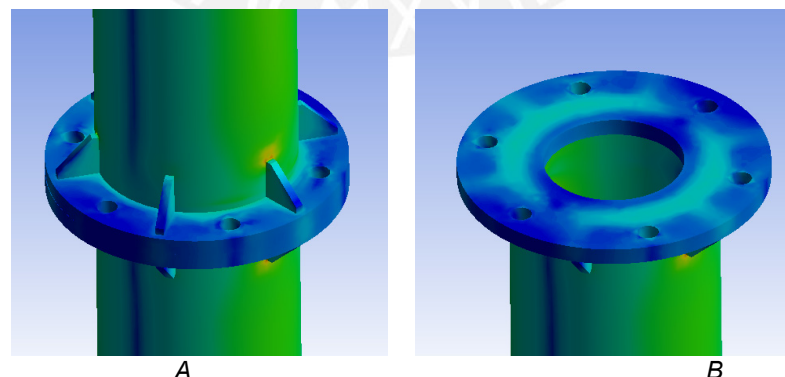


Figura 3.17. Distribución de esfuerzos en la brida de la unión del tercer y cuarto segmento

Los esfuerzos más altos se dan en la union de las orejas (a las que se amarran los cables) con la torre, donde los esfuerzos alcanzan un valor de casi 220 MPa como se observa en la figura 3.18A, también cabe resaltar que en esta zona se dan los

esfuerzos más altos según el diagrama de momentos flectores (figura 2.4) alcanzando valores de 100MPa.

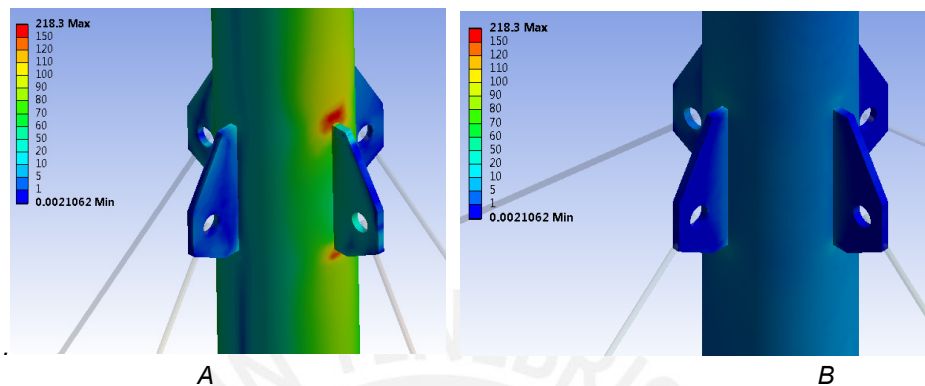


Figura 3.18. Distribución de esfuerzos en: A) Aletas de tensores superiores y B) Aletas de tensores inferiores.

Así como se muestran los valores de esfuerzos también se pueden graficar los desplazamientos de la torre por acción de las cargas aplicadas, ver figura 3.19, donde el desplazamiento máximo es igual a 97 mm y se da en la punta de la torre, este resultado es muy similar al obtenido en el modelo lineal (figura 3.4)

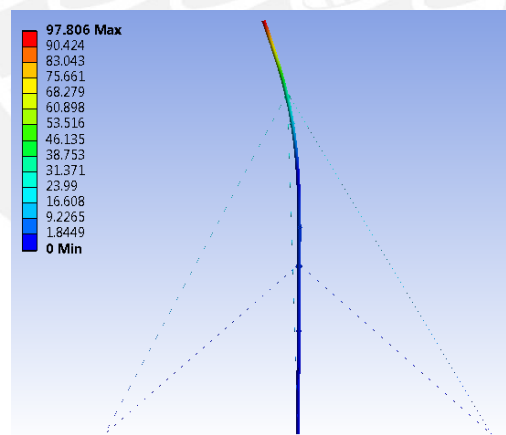


Figura 3.19. Desplazamientos de la torre, escala de deformación aumentada 16 veces.

Adicionalmente se obtuvieron los valores de las reacciones en la base de la torre, así como los valores de la tensión en los cables, en la tabla 3.4 se detallan los valores de tensiones máximos encontrados.

Tabla 3.4. Reacciones y tensiones en cables obtenidas en modelo sólido

Reacción en X	11.867 N
Reacción en Y	8841.6 N
Reacción en Z	1.995 N
Tensión de cable superior	4983.3 N
Tensión de cable inferior	1066.5 N

Adicionalmente también fue necesario conocer las características vibratorias del modelo sólido de la torre para así poder contrastarlas con los resultados obtenidos analíticamente y del modelo lineal mostrado en el acápite 3.2.3. Sin embargo, para este modelo se reemplazó la fuerza en la punta producida por el peso de los componentes por una masa puntual colocada en la parte superior de la torre, dicha masa es de 200 kg. Los resultados de las frecuencias naturales encontradas se pueden apreciar en la tabla 3.5, y presentan una gran similitud a los obtenidos en el modelo lineal (tabla 3.2) y los correspondientes al método analítico (tabla 2.6).

Tabla 3.5. Frecuencias naturales obtenidas del modelo sólido de la torre.

Modo 1	1.4097 Hz
Modo 2	1.4097 Hz
Modo 3	7.3056 Hz
Modo 4	7.3396 Hz
Modo 5	9.6577 Hz
Modo 6	12.935 Hz
Modo 7	18.058 Hz

Aplicando carga nominal de viento

Al imponer al modelo la carga del viento sobre la torre, obtenida según la normativa correspondiente (capítulo 1), se obtuvieron resultados muy similares a los mostrados con anterioridad (sin carga de viento sobre la torre), las cargas sobre el modelo aproximan más el comportamiento del modelo a la realidad. Se puede observar la similitud tanto en distribución como en valores en las figuras 3.18 y 3.20.

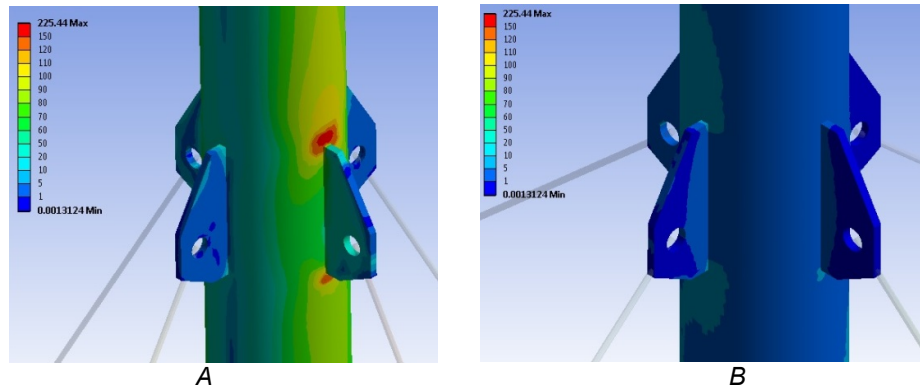


Figura 3.20. Distribución de esfuerzos en las orejas de la torre al aplicar viento sobre la torre.
A) En orejas de cables superiores. B) En orejas de cables inferiores.

En la figura 3.21 se puede observar que el máximo valor en la unión bridada también se da en un nervio, como en la figura 3.17, con un valor máximo de 120 MPa.

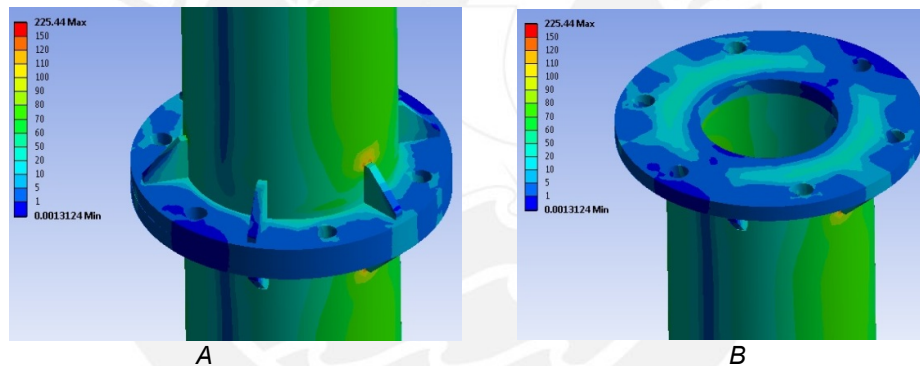


Figura 3.21. Esfuerzos en la brida de unión entre tercer y cuarto segmento A) Vista isométrica.
B) Distribución en cara de la brida.

Así también en la base se da una distribución de esfuerzos muy similar con valores de la misma magnitud como se comparan las figura 3.15 y 3.22.

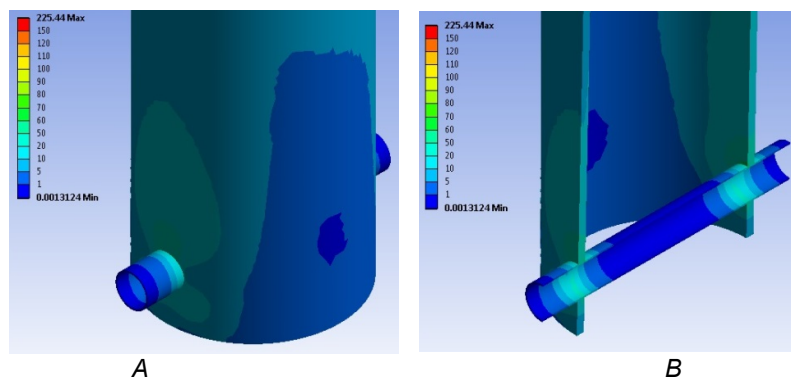


Figura 3.22. Distribución de esfuerzos en la base del aerogenerador. A) Vista exterior. B) Corte longitudinal.

Al igual que en el caso anterior, se encontraron las reacciones en el base de la torre, así como las tensiones en los cables de la torre. Si bien los valores obtenidos crecieron, no lo hicieron de manera significativa.

Tabla 3.6 Reacciones y tensiones en cables obtenidas en modelo sólido al aplicar carga de viento.

Reacción en X	34.544 N
Reacción en Y	9002.2 N
Reacción en Z	-1.814 N
Tensión de cable superior	5303.7 N
Tensión de cable inferior	889.12 N

3.4 Simulación de izaje de la torre

Así como es necesario conocer el comportamiento de la torre bajo las cargas asociadas al funcionamiento del aerogenerador, también lo es conocer los esfuerzos a los que está sometida la torre al momento de la instalación. Como explicado anteriormente la torre se encuentra articulada en la base; en un momento inicial, la torre se encuentra horizontal y con ayuda de una torre auxiliar de 5.5 metros (también articulada en la base) se realiza una maniobra de izamiento como se aprecia en la figura 1.10 del Capítulo 1. De esta manera la torre va cambiando de posición hasta estar totalmente vertical. Se realizarán dos simulaciones para el izaje, para evaluar la posición crítica de la torre en el izaje. Se simularon dos casos para evaluar la decisión de la empresa de emplear un cable auxiliar superior.

3.4.1 Etapa de pre – procesamiento

El modelo sólido y su correspondiente discretización son los mismos que se utilizaron en el problema estructural estático con modelo sólido, salvo la inclusión de la torre auxiliar de 5.5m y los cables correspondientes del izaje. Los modelos se pueden observar en las figuras 3.23 y 3.24.

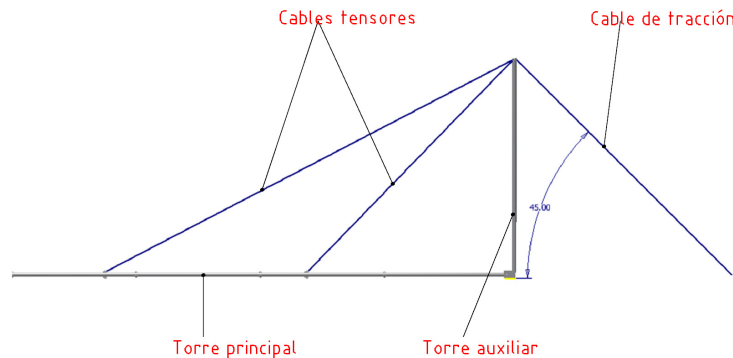


Figura 3.23. Esquema de montaje (sin cable superior auxiliar)

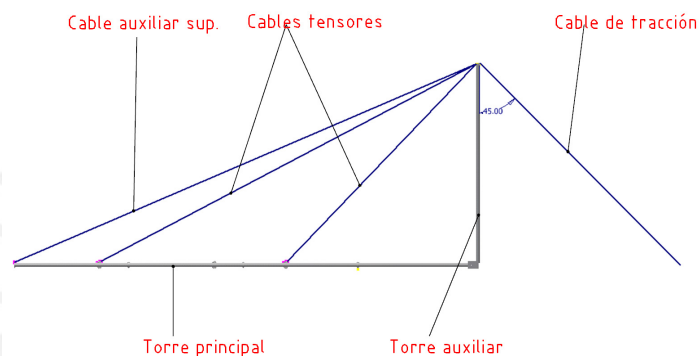


Figura 3.24. Esquema de montaje (con cable superior auxiliar)

La modelación y el mallado de la torre para el estudio del izaje utiliza los mismos modelos del análisis anterior. La particularidad de este estudio es la redistribución de los cables y la posición de la torre.

Las condiciones de borde aplicadas en ambas variantes son presentadas en la figura 3.25.

➤ Restricciones

- ❖ Restricción de desplazamientos en la base de ambas torres, solo se permite la rotación en uno de sus ejes (para la maniobra de izaje)
- ❖ Apoyo fijo en el extremo del cable (suelo) que realiza la maniobra de izaje. Desplazamientos y giros restringidos.

➤ Condiciones de carga

- ❖ Peso propio.

- ❖ Fuerza que representa el peso de los componentes estructurales y mecánicos igual a 1800N.

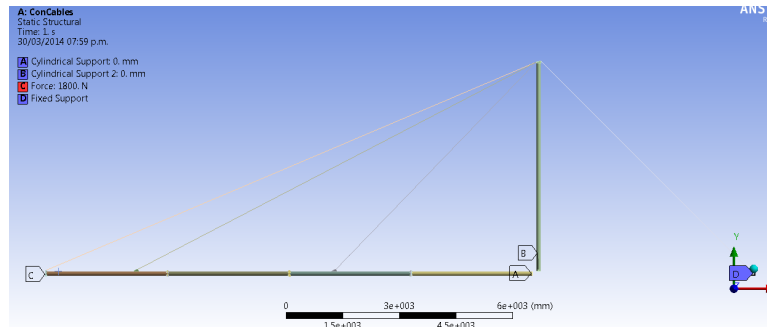


Figura 3.25. Condiciones de borde del izaje.

3.4.2 Etapa de procesamiento

Habiendo definido la geometría, la malla y las condiciones de borde se procedió a realizar ambas simulaciones. Se realizó un análisis estático estructural

3.4.3 Etapa de post – procesamiento

Variante sin cable superior auxiliar

La figura 3.26 muestra los resultados de desplazamiento total de la variante uno. El desplazamiento resultante máximo alcanzado se localiza en el extremo libre de la torre donde los valores están alrededor de los 144mm.

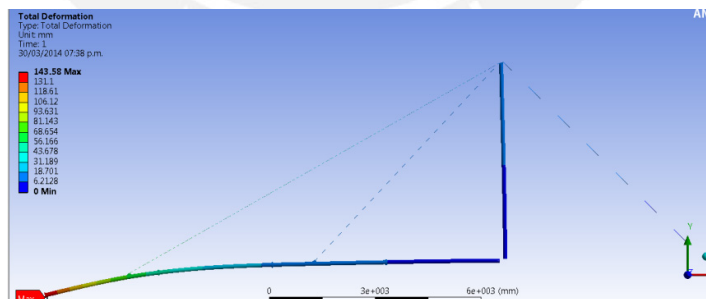


Figura 3.26. Deformación máxima obtenida sin el cable superior – variante uno.

Como lo ilustra la figura 3.27, los esfuerzos resultantes más altos se ubican en una de las uniones de la plancha soldada (orejas) con la torre. La unión se encuentra más próxima al borde libre de la torre. Los valores de esfuerzo en esta zona alcanzan los 310 MPa.

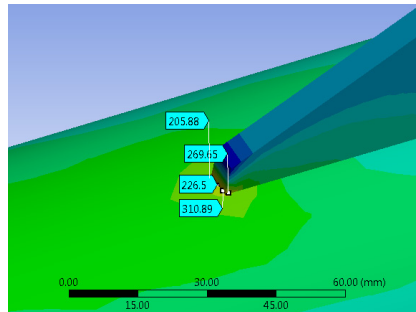


Figura 3.27. Esfuerzos alcanzados en las inmediaciones de la oreja superior – variante uno.

Variante dos: con cable superior auxiliar

La figura 3.28 muestra los resultados de desplazamiento total de la variante dos. El desplazamiento resultante máximo alcanzado se localiza en el extremo libre de la torre, donde los valores están alrededor de los 5 mm.

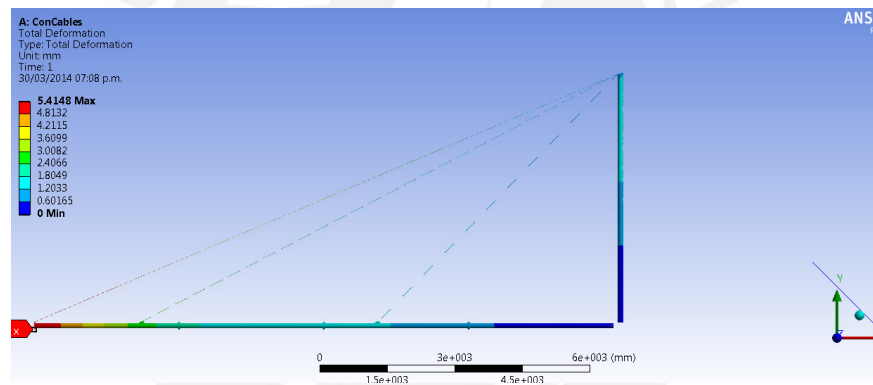


Figura 3.28 Deformación máxima obtenida con el cable superior – variante dos.

Como lo ilustra la figura 3.29, los esfuerzos resultantes más altos se ubican en una de las uniones de la plancha soldada (orejas) con la torre. A diferencia de los resultados de la variante uno, un cable adicional aliviado la zona y los esfuerzos alcanzan valores alrededor de los 20 MPa.

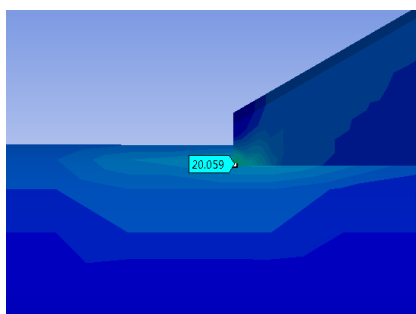


Figura 3.29. Esfuerzos alcanzados en las inmediaciones de la oreja superior – variante dos.

3.5 Simulación de ensamble de eje principal, chasis, tornamesa y cola

Así como se siguió un procedimiento para la simulación de la torre, se aplicó el mismo procedimiento para la simulación del ensamble superior de la torre, de esta manera se conoció el comportamiento del ensamble superior compuesto por el eje principal, el chasis y el tornamesa.

Adicionalmente también fue de interés conocer la influencia del tipo de modelamiento de los pernos en las uniones, por lo que se probaron distintas maneras de simular las uniones atornilladas.

3.5.1 Etapa de pre – procesamiento

3.5.1.1 Definición de geometría

De igual manera que con las anteriores simulaciones, se comenzó con obtener modelos geométricos de las piezas reales, dado a que algunos diagramas de la empresa solicitante se encontraban incompletos, se tuvo que realizar mediciones en el taller de la empresa. A continuación se muestran las piezas reales y su comparación con el modelo geométrico desarrollado en un software CAD.



Figura 3.30. Bocamasa y eje de tornamesa real

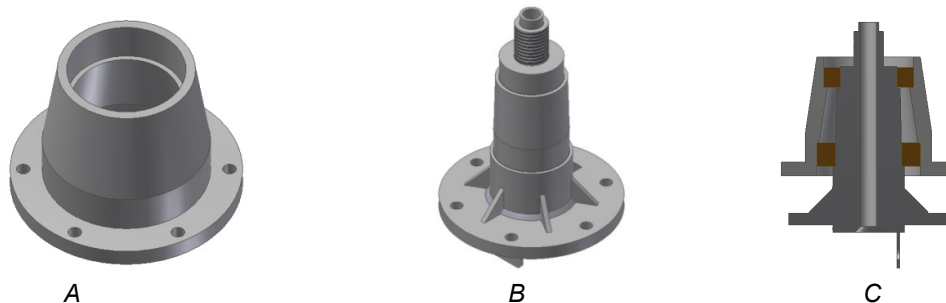
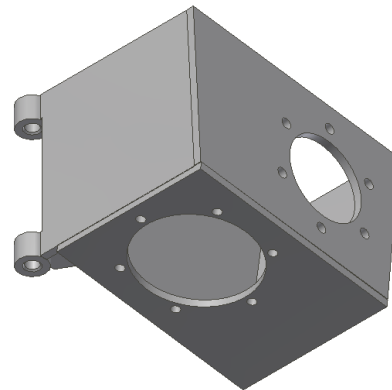


Figura 3.31. Modelos geométricos de A) bocamasa de tornamesa. B) eje de tornamesa. C) ensamble de tornamesa con cojinetes que permiten el giro entre ambas partes.



A



B

Figura 3.32. A) Chasis real. B) Modelo geométrico de chasis.



Figura 3.33. Eje principal real.

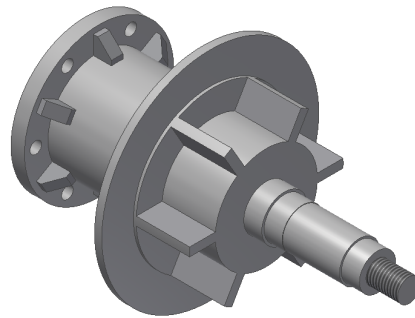


Figura 3.34. Modelo geométrico del eje principal.



Figura 3.35. Modelo geométrico de la cola.

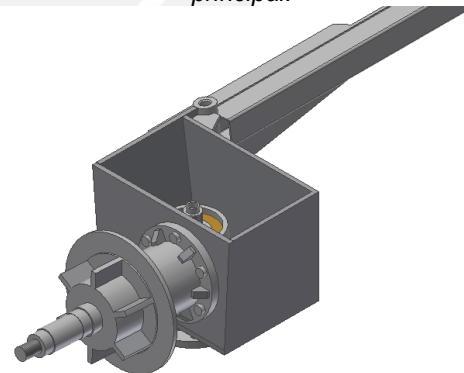


Figura 3.36 Modelo geométrico del ensamble superior del aerogenerador.

Las formas de representar las uniones son las siguientes:

- Unión sin pernos agujeros con movimiento relativo restringido (figura 3.37A). Para este modelo se usó una unión entre los agujeros, de manera que el movimiento relativo entre ellos fuera restringido

- Unión con pernos simulados como uniones BEAM (Figura 3.37B). A estos elementos se les asigna el diámetro del perno y los extremos se unen a la cara mediante ecuaciones de restricción, las uniones a las caras se dan a los nodos más cercanos en un radio de influencia el cual equivale al radio de la cabeza del perno o de la tuerca. Este método se le denomina informalmente como *Spiderbolt*, por la semejanza que existe entre las ecuaciones de restricción y una tela de araña. También se puede realizar con elementos lineales.
- Unión con pernos simplificados (Figura 3.37C). Para esta unión se modelaron pernos simplificados para simular la unión atornillada, se espera que con esta simulación se aprecien todos los efectos de manera más aproximada a la realidad.

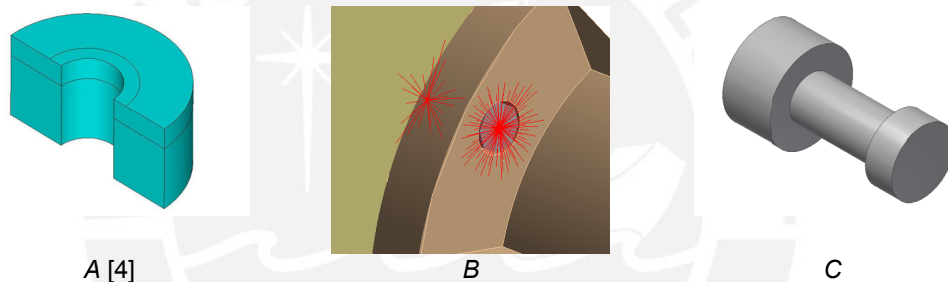


Figura 3.37. Diversos modelos para simulación de uniones atornilladas.

A los tres modelos se aplicarán las mismas condiciones de carga y apoyos y se espera que los resultados más aproximados a la realidad se encuentren en las simulaciones de los pernos simplificados sólidos como se ve en la figura 3.38. Se podría obtener aun resultados más exactos simulando los pernos con todos sus detalles constructivos, sin embargo, una simulación de esa naturaleza tendría una cantidad extremadamente alta de elementos para poder modelar los dientes del tornillo y los resultados no variarían de manera significativa, sin embargo, se podría apreciar de manera completa todos los fenómenos en los dientes.

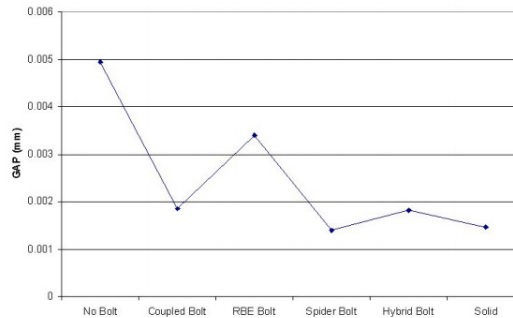


Figure 17 - Gap

Figura 3.38. Diferencias de los resultados obtenidos con diversos métodos de simulación de uniones atornilladas. [18].

3.5.1.2 Discretización

Siguiendo con el procedimiento de simulación, se realizó el mallado o discretización del ensamble, obteniéndose la siguiente malla luego de aplicar diversos métodos de mallado y tamaño de malla.

La gran mayoría de elementos se discretizó utilizando elementos tetraédricos por las diversas curvaturas que existen en los modelos, para el caso de los elementos del tornamesa, se utilizaron tamaños de 3mm en el eje y de 5mm en la bocamasa, como se aprecia en la figura 3.39.

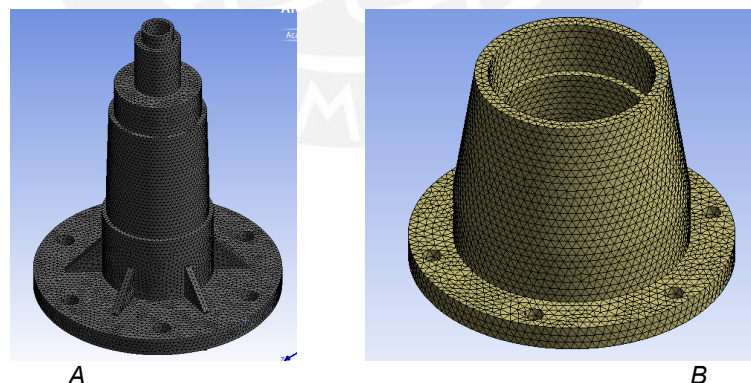


Figura 3.39. Malla en el tornamesa: A) malla del eje de tornamesa, tamaño de elemento 3mm. B) Malla de bocamasa, tamaño de elemento 5mm

Para el caso del chasis, se realizó un mallado tetraédrico, buscando obtener una malla estructurada en las caras, debido a que muchas de estas no poseían concentradores de esfuerzos, se utilizaron elementos de hasta 10 mm en las caras. Se puede apreciar la malla en la figura 3.40.

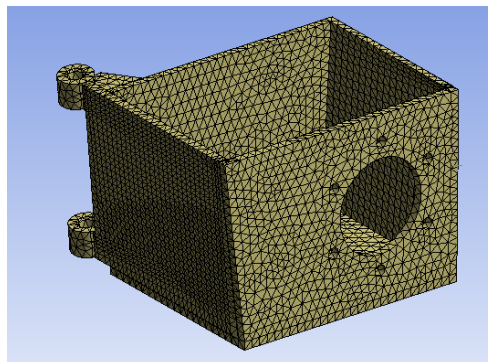


Figura 3.40. Malla en el chasis del aerogenerador. Tamaño de elemento 10mm.

En el eje principal, el cual soporta al rotor, también se utilizaron elementos tetraédricos de 2 hasta 5 milímetros, como se aprecia en la figura 3.41.

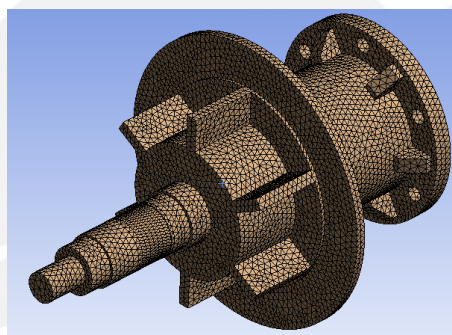


Figura 3.41. Malla del eje principal, con tamaño de elemento de 5mm.

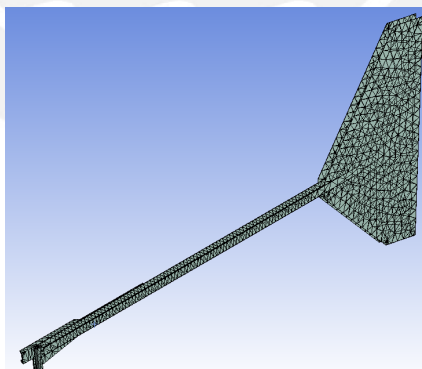


Figura 3.42. Malla de la cola del aerogenerador. Tamaño de elemento 50mm.

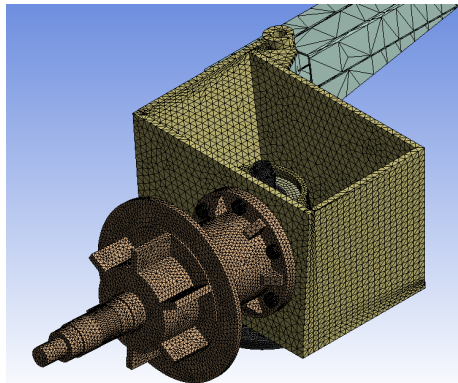


Figura 3.43. Malla del ensamble superior.

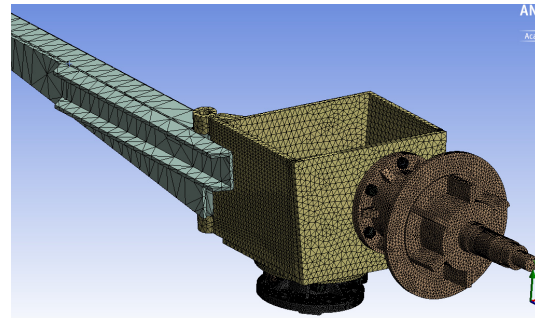


Figura 3.44. Malla del ensamble superior desde vista frontal izquierda.

En general se obtuvo una malla con las características mostradas en la tabla 3.7, donde los distintos parámetros de evaluación de malla (explicados en el capítulo 1, acápite 1.5.3) indican que en se tiene una malla de buena calidad con distorsión admisible en la forma de los elementos.

Tabla 3.7. Propiedades de las mallas generadas para el análisis del ensamble superior.

Parámetro \ Malla	Con pernos modelados como sólidos	Sin pernos modelados, unión entre agujeros.	Con pernos modelados como beam
# de nodos	975434	760492	760492
# de elementos	636568	493924	493924
Element Quality	0.8187	0.8187	0.8187
Aspect Ratio	2.4728	2.4728	2.4728
Jacobian Ratio	1.0323	1.0323	1.0323
Skewness	0.24792	0.24792	0.24792
Orthogonal quality	0.8392	0.8392	0.8392

3.5.1.3 Condiciones de borde

Con la malla generada se procedió a definir las condiciones de borde para el modelo, las fuerzas empleadas son las que figuran en la tabla 1.1 y la figura 2.11, que corresponden a los pesos del generador y palas y a las cargas aerodinámicas asociadas al funcionamiento (ver anexo 2). La figura 3.45 muestra las cargas sobre el eje principal.

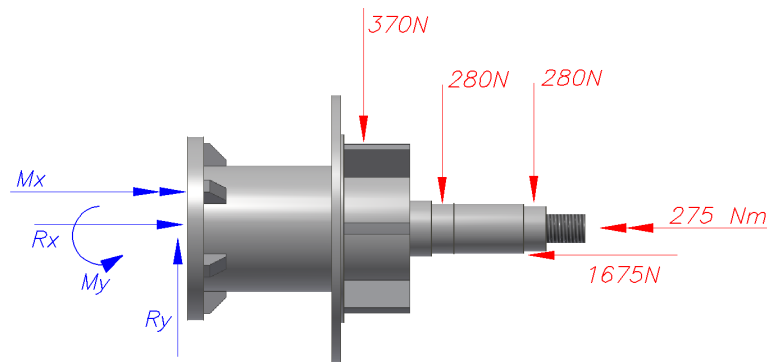


Figura 3.45. En rojo se aprecian las fuerzas que fueron cargadas en el modelo computacional (ver figura 2.11)

El apoyo para el modelo se dio en los agujeros del eje del tornamesa en los cuales van los pernos que lo unen a la torre. Dichos agujeros tienen todos los grados de libertad restringidos.

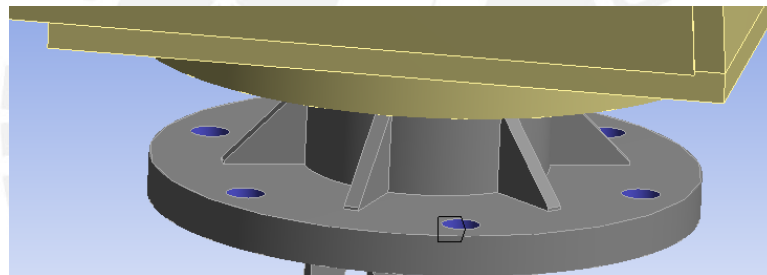


Figura 3.46. Apoyo fijo del ensamblaje, agujeros se unirán a la torre con pernos.

3.5.2 Etapa de procesamiento

Una vez establecida la geometría, la malla y las condiciones de borde se procedió a realizar la simulación numérica. Para este caso se realizó un análisis estático estructural lineal, buscando encontrar esfuerzos, deformaciones y reacciones en los apoyos. Para esta simulación se probaron distintos métodos para simular las uniones atornilladas y se compararon los resultados obtenidos.

3.5.3 Etapa de post – procesamiento

Una vez realizada la simulación, se obtuvieron los resultados gráficos de esfuerzos y deformaciones. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

3.5.3.1 Resultados del eje principal

Para el eje principal se obtuvo la siguiente distribución de esfuerzos mostrada en las figuras 3.47, 3.48, 3.49, 3.50. Se aprecia que existe una diferencia entre los esfuerzos equivalentes máximos hallados en MPa (Figura 3.47), pero que en general la distribución es la misma.

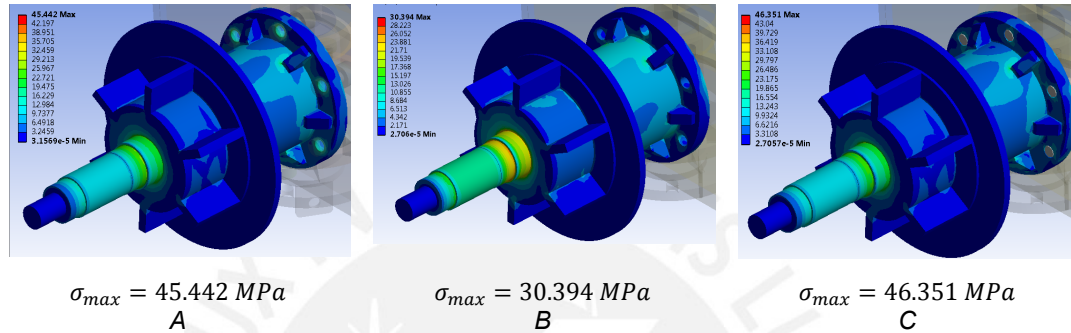


Figura 3.47. Distribución de esfuerzos del eje principal para las simulaciones A) con tornillos sólidos B) sin tornillo sólido C) Spiderbolt. Todos en MPa.

El valor máximo en el caso del modelo con tornillos sólidos (figura 3.48A) se da en los nervios cercanos a la unión, mientras que en el caso de la unión sin tornillos el máximo se da en el cambio de diámetros anteriores a las placas rectangulares del bobinado (figura 3.47B). Asimismo se observa gran semejanza entre los resultados obtenidos con un tornillo sólido y con el modelo Spiderbolt.

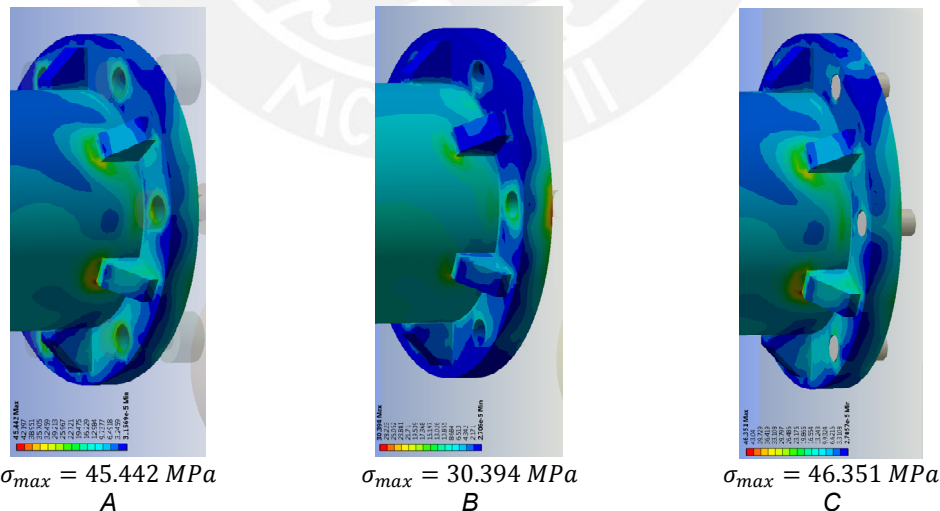


Figura 3.48. Distribución de esfuerzos en la unión atornillada en la simulación, vista inferior rotada A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. Todos en MPa.

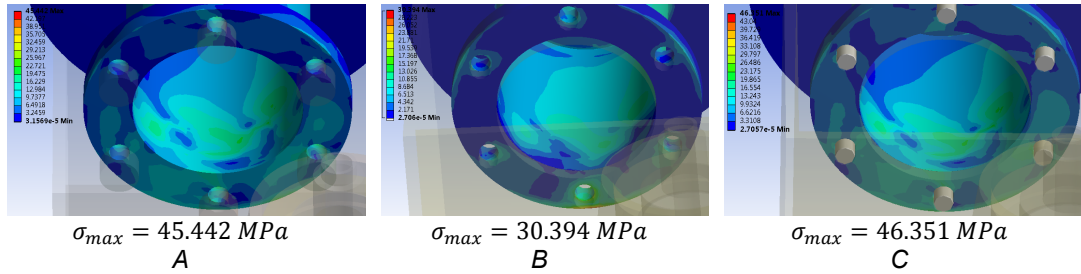


Figura 3.49. Distribución de esfuerzos en la parte posterior del eje principal A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En MPa.

Asimismo se puede mostrar gráficamente los resultados obtenidos de desplazamientos del eje principal, como se muestra en la figura 3.50, se aprecia que los desplazamientos (en mm) tienen valores pequeños, en el orden de las décimas de milímetro, alcanzando un máximo en el extremo de 0.05 mm para los tres casos.

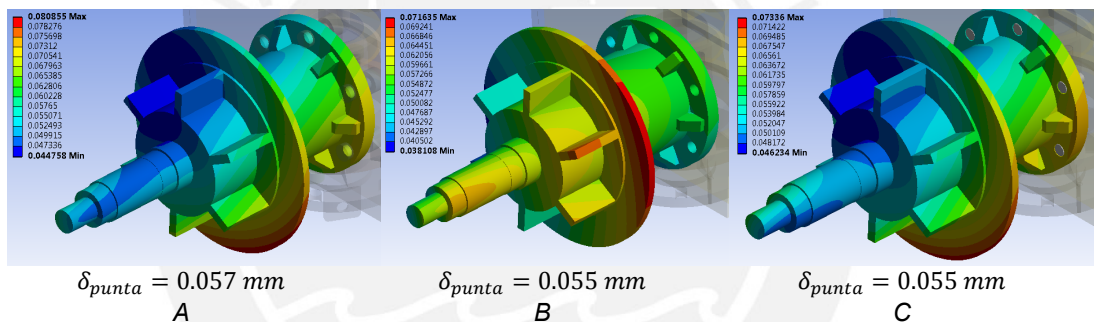


Figura 3.50. Desplazamientos en el eje principal A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos. En milímetros.

3.5.3.2 Resultados del chasis

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el chasis, para ambas simulaciones, con y sin pernos sólidos y con *spiderbolts*. Este componente presenta la mayor similitud de resultados obtenidos en comparación con el eje principal, tanto en esfuerzos como en desplazamientos, así como su distribución, como se aprecia en la figura 3.51, y la que sufre la menor influencia por el tipo de modelo usado para los tornillos.

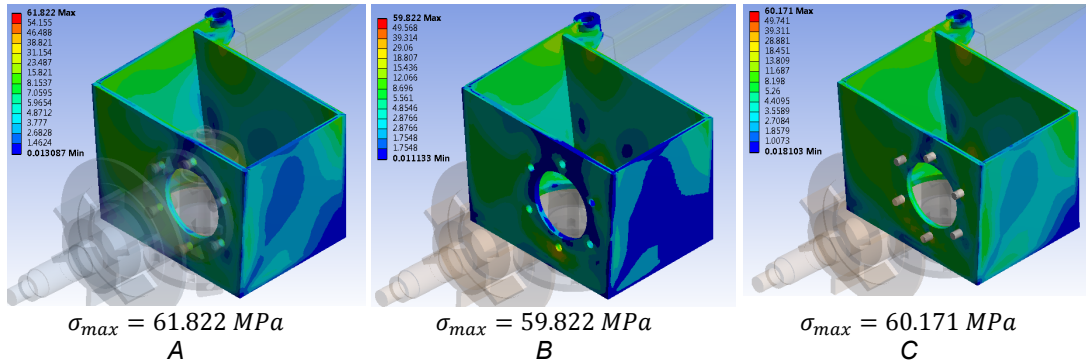


Figura 3.51. Distribución de esfuerzos en el chasis A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos. C) Spiderbolt. En MPa.

La distribución de esfuerzos al interior del chasis también presenta una gran similitud como se aprecia en la figura 3.52

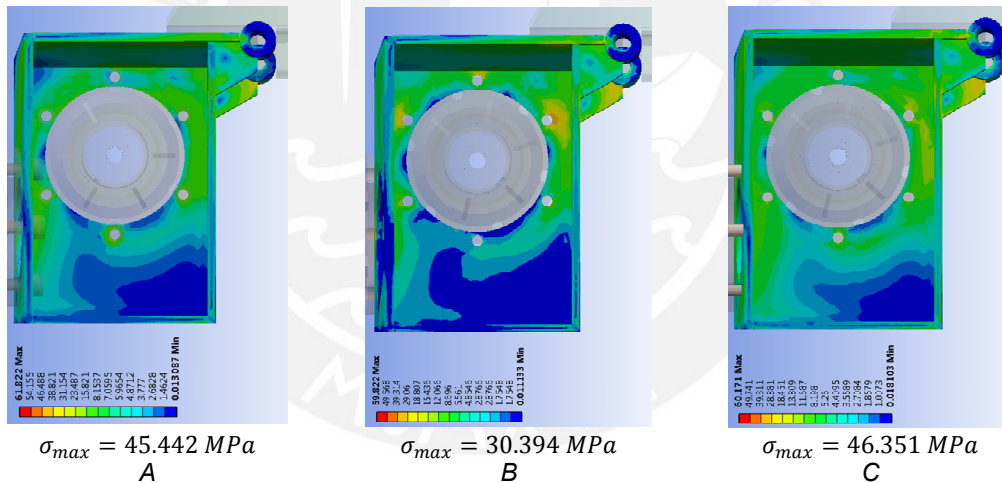


Figura 3.52. Distribución de esfuerzos en el chasis, vista superior. A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En MPa.

Los desplazamientos del chasis se aprecian en la figura 3.53, con un valor máximo en las bocinas que actúan como bisagra. Este desplazamiento se da como consecuencia del peso de la cola.

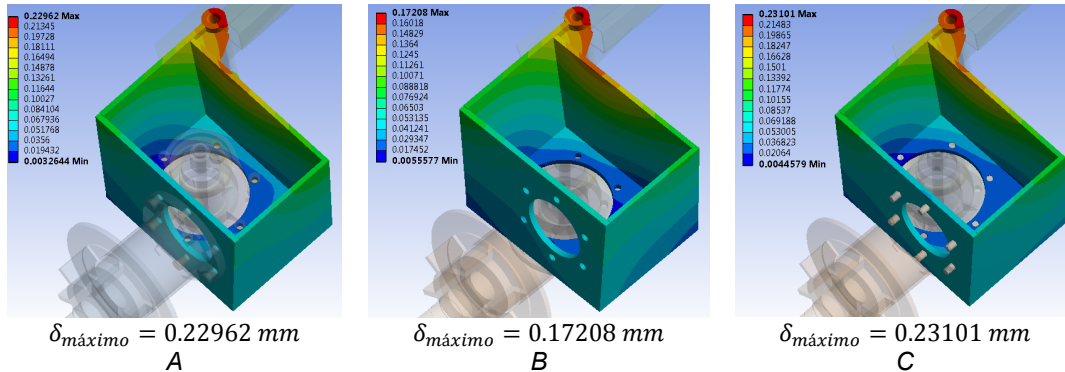


Figura 3.53. Desplazamientos en el chasis, vista superior. A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos. En milímetros.

3.5.3.3 Resultados en la bocamasas de tornamesa

Los resultados obtenidos para la bocamasa del tornamesa se ilustran en las figuras 3.54 y 3.55. A pesar de que los valores de esfuerzos obtenidos sean muy similares, se puede observar que las distribuciones no lo son, y los máximos se dan en distintos lugares, como en el cambio de sección (figura 3.54A) o en los agujeros (figura 3.54C).

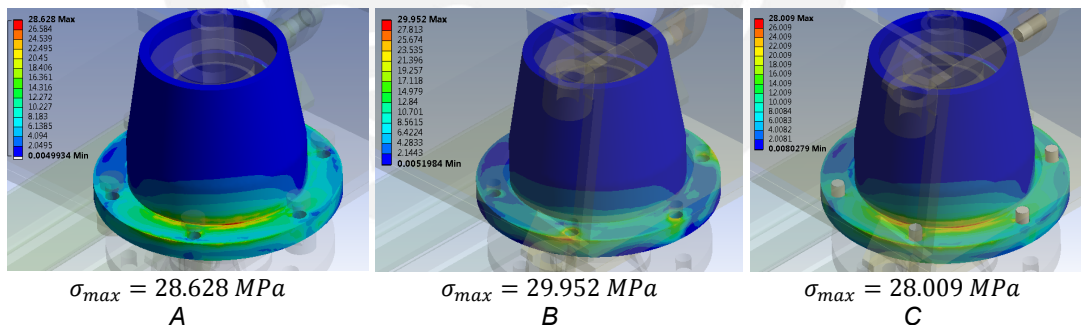


Figura 3.54. Esfuerzos equivalentes en la bocamasa, vista posterior. A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En MPa.

El valor del desplazamiento máximo es muy similar y se da en la misma zona en los tres casos, con un valor de 0.040 mm en la parte superior de la bocamasa.

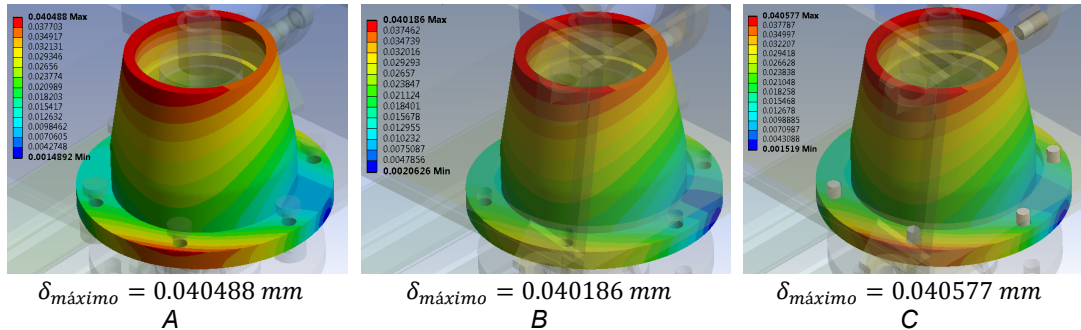


Figura 3.55. Desplazamientos en la bocanasa A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En milímetros.

3.5.3.4 Resultados del eje del tornamesa

Así como en la bocanasa, los resultados de esfuerzos y distribuciones fueron muy similares en el caso del eje del tornamesa, como se aprecia en las siguientes figuras (figura 3.56 y 3.57). La poca influencia que tienen los distintos tipos de uniones puede darse debido a que este cuerpo no está directamente entornillado a los demás del ensamble superior, pero si lo está a la torre. En todos los casos se encontró un esfuerzo máximo de 60 MPa en una de las uniones, y un desplazamiento máximo de 0.046 mm.

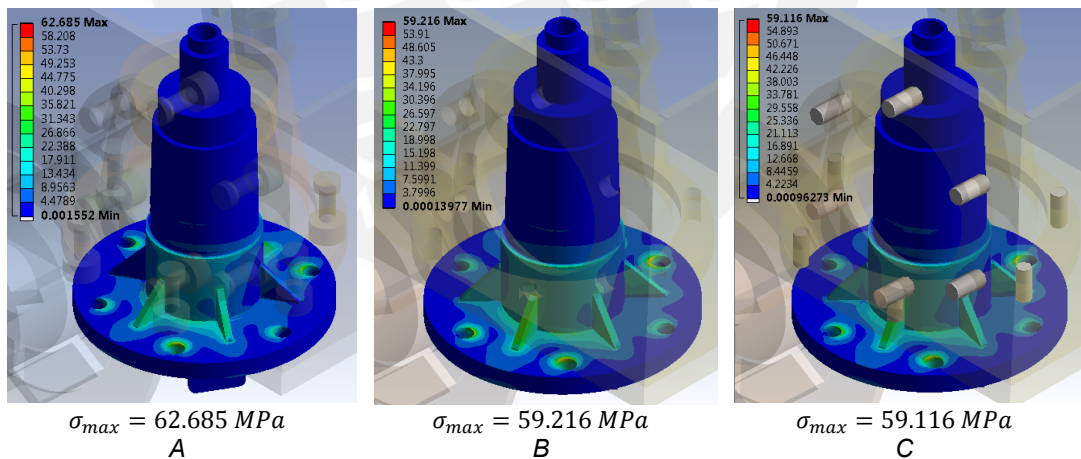


Figura 3.56. Esfuerzos equivalentes en el eje de la tornamesa A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En MPa.

El máximo esfuerzo al que está sometido el eje de tornamesa se encuentra en la superficie adyacente a uno de los agujeros donde los esfuerzos alcanzan un valor de aproximadamente 60 MPa.

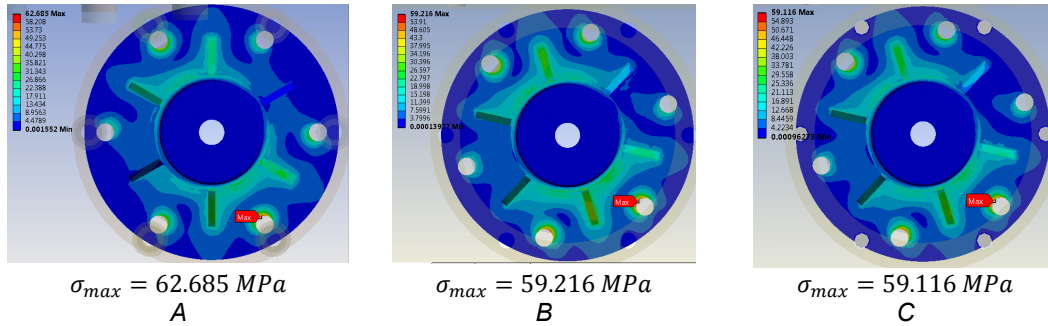


Figura 3.57. Esfuerzos equivalentes en el eje del tornamesa, vista superior A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En MPa.

El desplazamiento máximo en el eje de tornamesa se encuentra en el extremo de los componentes alcanzando un desplazamiento máximo de 0.046 mm, el cual se da en el eje vertical.

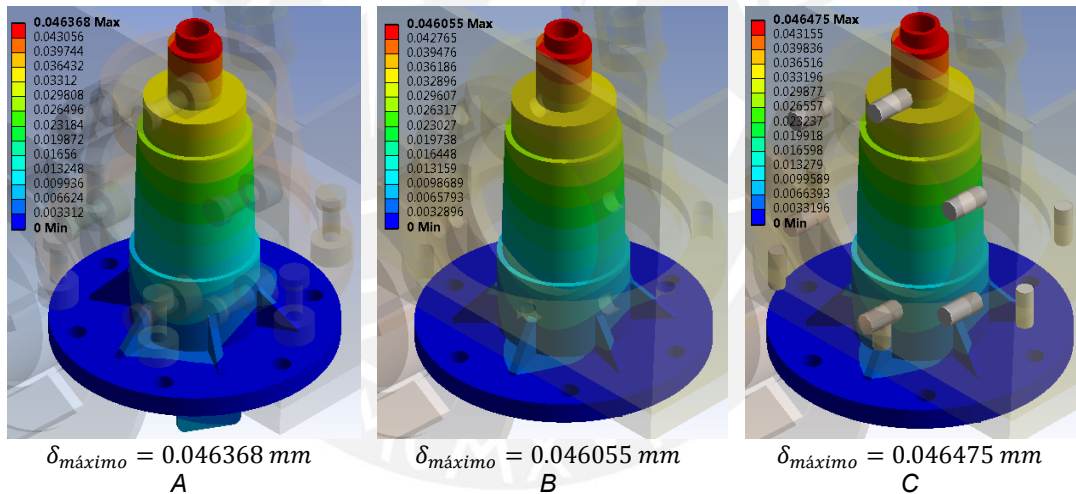


Figura 3.58. Desplazamientos en el eje del tornamesa A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En milímetros.

3.5.3.5 Resultados de la cola del aerogenerador

Se graficaron los resultados en la cola del aerogenerador, donde se encontró un esfuerzo equivalente máximo de 56.5 MPa en todos los casos, debido a concentradores de esfuerzos. En las figuras 3.59 se ve que a un tercio del apoyo existe una zona donde los esfuerzos crecen y luego vuelven a bajar, esto se debe a que en esa zona hay un cambio de sección en la torre y se incrementa su momento de inercia, por lo que el valor de los esfuerzos comienza a descender.

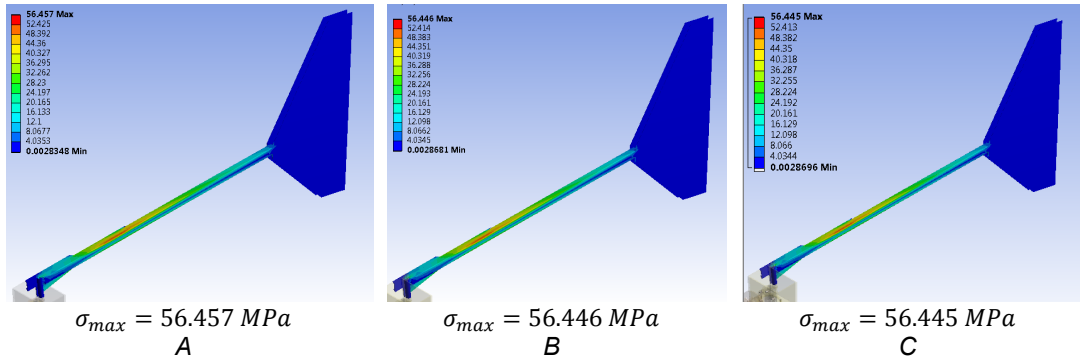


Figura 3.59. Esfuerzos equivalentes en la cola A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En MPa.

En el caso de los desplazamientos, se observa que el máximo valor es alcanzado en la punta de la cola con un valor máximo de 26 mm (figura 3.60).

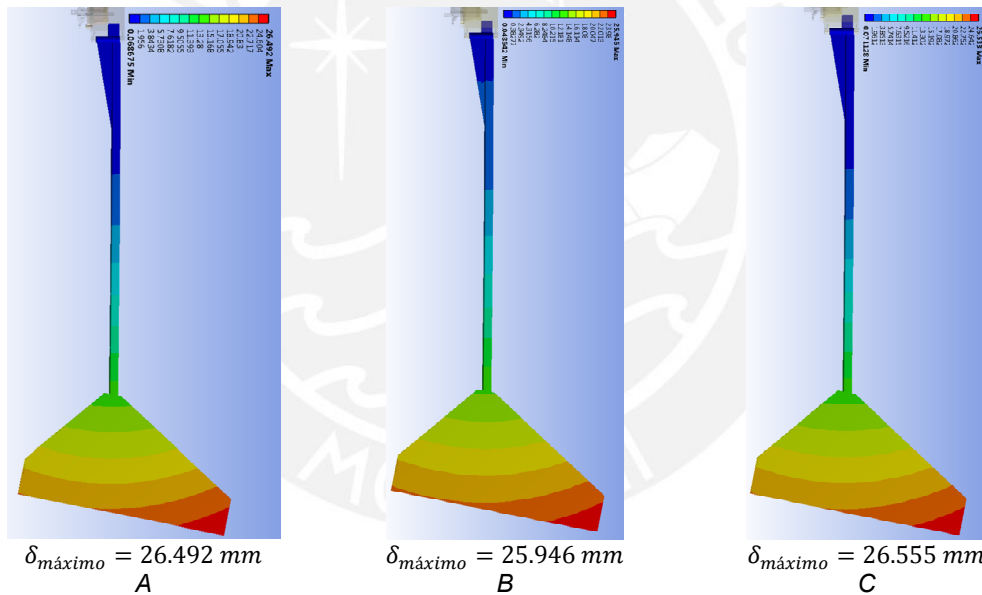


Figura 3.60. Desplazamientos cola A) con tornillos sólidos B) sin tornillos sólidos C) Spiderbolt. En mm.

3.6 Simulación del aerogenerador bajo carga sísmica

Para poder comprobar la resistencia de la estructura ante la carga sísmica que se puede dar en el lugar, se aplicó la carga sísmica calculada en la sección Cargas de la norma E.030 (diseño sismo-resistente), como se detalla en el primer capítulo de la presente tesis. La cortante basal calculada fue de 155.38 kgF, la cual se aplicó en la parte superior de la torre del aerogenerador debido a que se considera que no existe otro punto que aporte la rigidez lateral necesaria a lo largo de la torre y debido a que se considera como un caso crítico colocar toda la carga sísmica en la parte superior.

El primer caso corresponde a la cortante basal actuando perpendicular a la carga de empuje y torque por el funcionamiento del aerogenerador, el modelo geométrico y mallas usadas son las mismas que en la simulación de la torre y se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las figuras 3.61 y 3.62. Como se aprecia en ambas figuras, las distribuciones de esfuerzos no cambiaron radicalmente, llegándose a valores de esfuerzos altos a lo largo del tramo superior de la torre (bordeando los 200MPa en puntos pequeños como se ve en la figura 3.61A.

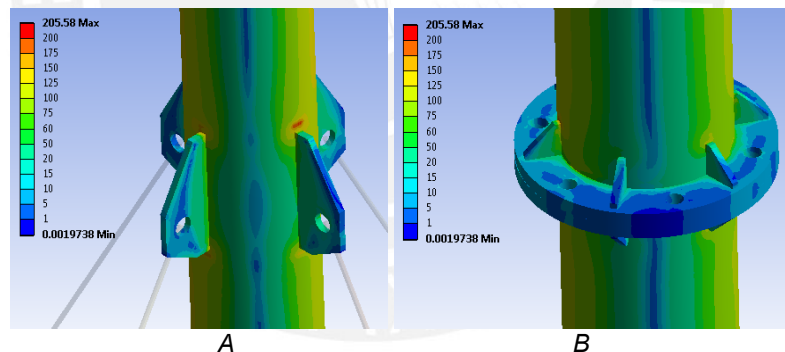


Figura 3.61. A) Esfuerzos (MPa) en la unión de cables superior al estar el aerogenerador sometido a carga sísmica. B) Esfuerzos en la unión bridada superior (segmentos 3 y 4)

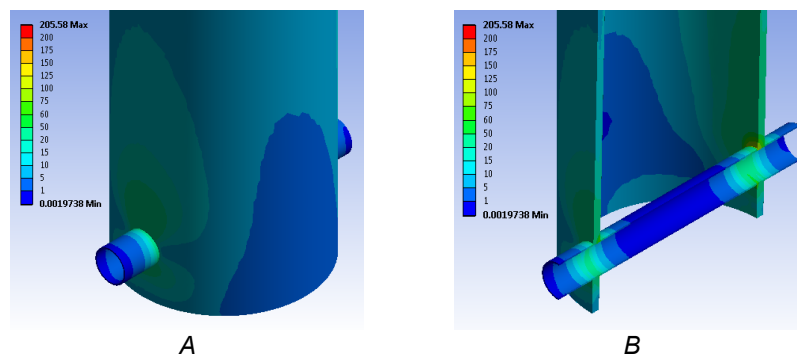


Figura 3.62. Distribución de esfuerzos (MPa) en la base del aerogenerador cuando está sometido a carga sísmica en sentido Z. A) vista exterior. B) Corte longitudinal

Tabla 3.8 Reacciones y tensiones en cables obtenidas en modelo sólido al aplicar cortante basal perpendicular al viento

Reacción en X	15.022 N
Reacción en Y	13497 N
Reacción en Z	8.9758 N
Tensión de cable superior	5014 N / 4673.2 N
Tensión de cable inferior	1106.4 N / 1054.3 N

El siguiente caso simulado corresponde a la cortante basal en el sentido del viento, este caso resultó ser más crítico como el anterior, y se obtuvieron resultados similares en la base, donde ocurre una falla en la unión superior de las orejas, con un esfuerzo máximo en dicha zona de 490MPa. El desplazamiento en la punta de la torre alcanza un máximo de 188.7 mm.

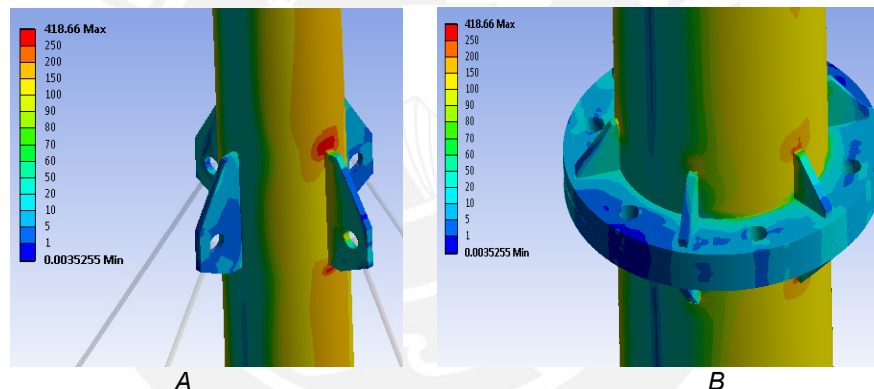


Figura 3.63. Distribución de esfuerzos (MPa) provocados por cortante basal en sentido X, a favor del viento. A) En orejas para los cables. B) En la unión bridada superior

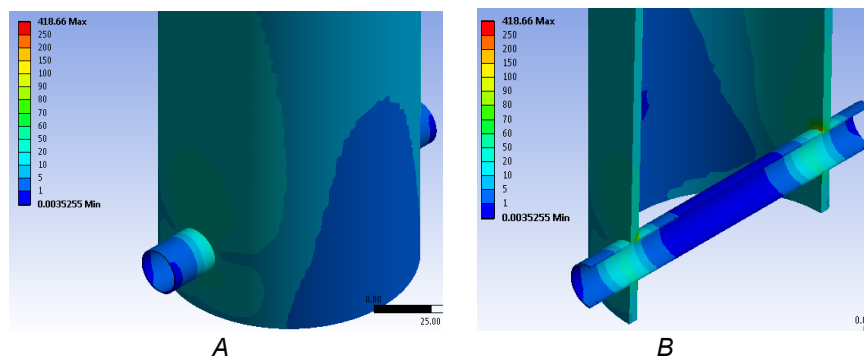


Figura 3.64. Distribución de esfuerzos (MPa) en la base del aerogenerador por cortante basal en sentido X, a favor del viento. A) por fuera. B) corte longitudinal.

Tabla 3.9 Reacciones y tensiones en cables obtenidas en modelo sólido al aplicar cortante basal en sentido del viento

Reacción en X	31.188 N
Reacción en Y	13509 N
Reacción en Z	5.9318 N
Tensión de cable superior	9582.5 N
Tensión de cable inferior	2115.3 N

Como se ve en las anteriores simulaciones, la torre en general no falla por en caso de sismo, sino que una de las uniones es la que se encuentra en peligro, al alcanzarse en ella esfuerzos con un valor alto.

3.7 Simulación con combinaciones de carga según método LRFD

Para poder conocer el comportamiento de la torre bajo diferentes condiciones de carga, otras a las empleadas anteriormente, se empleó el método LRFD explicado en el capítulo 1, como recomendación del AISC y la norma peruana RNE. El modelo usado fue el mismo utilizado en las anteriores simulaciones, con la misma malla y condiciones de borde, la diferencia radica en las cargas aplicadas a la estructura, y en la magnitud de dichas cargas, debido a que se aplicaron las combinaciones de carga y factores indicados por el método LRFD. Para este método se obtuvieron los siguientes resultados que pueden apreciarse en las siguientes tablas, donde se encuentran los resultados de esfuerzos (tabla 3.10), reacciones (tabla 3.11), tensión en cables (tabla 3.12) y desplazamientos en la torre (tabla 3.13).

Tabla 3.10. Esfuerzos encontrados según LRFD

Combinación de carga	Localización de máximos esfuerzos	Valor de máximo esfuerzo	¿Falla?
1.4D	-	-	No
1.2D+1.6L	Orejas cables superiores	351.83 MPa	Sí
1.2D+0.8W	Apoyo base	29.766 MPa	No
1.2D+1.6W+0.5L	Orejas cables	119.81 MPa	No
1.2D+1.0E+0.5L	Orejas cables	180.94 MPa	No
0.9D+1.6W	Apoyo base	27.881 MPa	No
0.9D+1.0E	Apoyo base	189.2 MPa	No

Tabla 3.11. Reacciones en el apoyo para combinaciones según LRFD

Combinación de carga	Reacción X (N)	Reacción Y (N)	Reacción Z (N)
1.4D	-	-	-
1.2D+1.6L	25.778 N	12449 N	3.0096 N
1.2D+0.8W	17.996 N	4355.3 N	0 N
1.2D+1.6W+0.5L	41.233 N	6881.4 N	0.35667 N
1.2D+1.0E+0.5L	5.129 N	11067 N	-21.732 N
0.9D+1.6W	36.512 N	4080.3 N	0.001392 N
0.9D+1.0E	0.2161 N	7970.9 N	19.265 N

Tabla 3.12. Fuerzas máximas en cables tensores para combinaciones según LRFD.

Combinación de carga	Fuerza en cables superiores (N)	Fuerza en cables inferiores (N)	¿Falla?
1.4D	-	-	No
1.2D+1.6L	8041.1N	1772.6N	No
1.2D+0.8W	253.28 N	145.5 N	No
1.2D+1.6W+0.5L	2999 N	240.53 N	No
1.2D+1.0E+0.5L	4483 N	901.76 N	No
0.9D+1.6W	506.08 N	290.54 N	No
0.9D+1.0E	4508 N	914 N	No

Tabla 3.13. Desplazamientos máximos encontrados

Combinación de carga	Desplazamiento máximo
1.4D	-
1.2D+1.6L	158.67 mm
1.2D+0.8W	2.888 mm
1.2D+1.6W+0.5L	54.272 mm
1.2D+1.0E+0.5L	100.5 mm
0.9D+1.6W	5.4207 mm
0.9D+1.0E	88.298 mm

Como se puede apreciar en los resultados de la tabla 3.10, existen combinaciones de carga que hacen que la estructura falle ya que se exceden los límites de resistencia del material en zonas relativamente amplias, tal como se muestra en el anexo 6.

3.8 Simulación de condición crítica de funcionamiento

Se planteó la condición crítica actual del aerogenerador al romperse uno de los cables tensores superiores; para lo cual se retiró dicho elemento de la simulación en la etapa de pre procesamiento. Cabe destacar que dicho estudio corresponde a un estudio estático y no al momento en el que sucede el desprendimiento del cable, el cual debe abordarse mediante un estudio dinámico.

Se consideraron las cargas nominales empleadas en los acápites 3.2 y 3.3 (paginas 50 a 63) y que se resumen en la tabla 1.1.

De esta manera el modelo geométrico queda como se muestra en la figura 3.65, donde se retiró el cable que soportaba la mayor carga y cuya unión podría fallar.

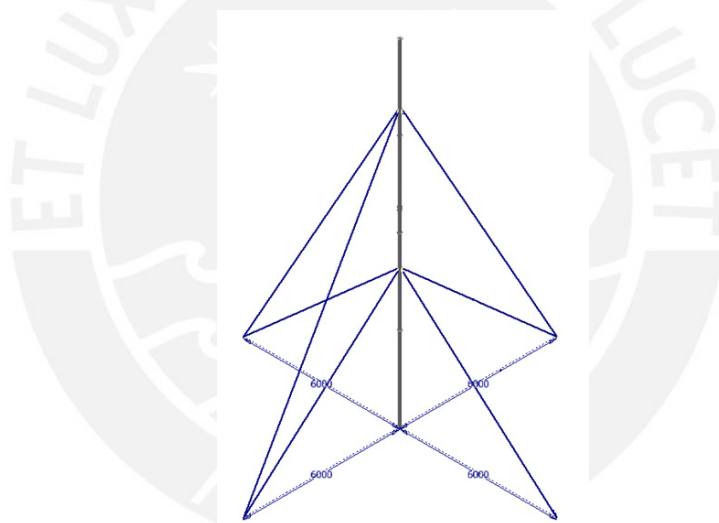


Figura 3.65. Modelo geométrico empleado para el caso crítico. Nótese la ausencia de uno de los cables tensores.

La discretización y las condiciones de borde impuestas al modelo son las mismas que en la simulación del modelo sólido.

Como se aprecia en la figura 3.66, los esfuerzos a lo largo de la torre del aerogenerador toman valores extremadamente altos, indicando la falla inminente en caso de que no se cuente con el cable superior en la torre. Como se aprecia, los esfuerzos a lo largo de un gran porcentaje de la torre alcanzan valores de hasta 350 MPa; así como valores de hasta 500 MPa en zonas donde existen concentradores.

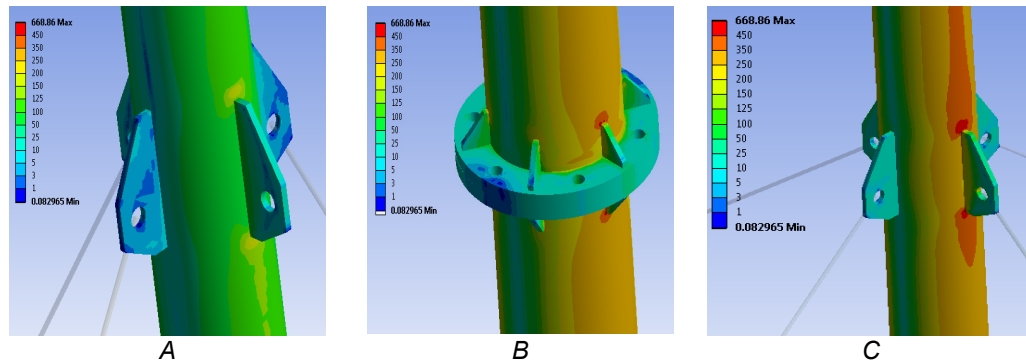


Figura 3.66. Esfuerzos (MPa) en las diversas zonas de la torre al retirar el cable superior, en MPa A) Zona de unión de los cables superiores. B) Unión bridada más cargada. C) Unión de cables inferiores, con los esfuerzos más altos.

Asimismo, los desplazamientos en la torre son excesivos, alcanzando valores de hasta 1.1 m en la parte superior de la torre, lo que significa que el aerogenerador sale de su posición de trabajo.

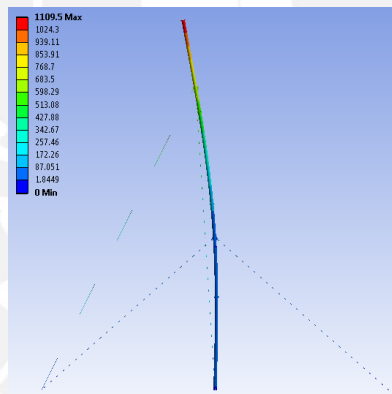


Figura 3.67. Desplazamientos en la torre (en mm). Escala real.

Al demostrar lo crítica que es la unión de los cables superiores a la estructura, se definió que sería conveniente realizar un análisis más detallado a la unión, o una propuesta de modificación de la torre.

CAPÍTULO 4

Comparación de resultados y propuestas de mejora

La comparación de los resultados obtenidos mediante simulación numérica, permite determinar la factibilidad de continuar el uso del método computacional o si es necesario realizar ciertas correcciones. Idealmente la comparación de resultados se debería llevar a cabo con resultados experimentales y con los resultados de cálculos analíticos y normas técnicas.

4.1 Comparación de resultados de la torre

Se realizó la comparación de los resultados analíticos obtenidos con los resultados de las diferentes simulaciones realizadas, tanto para esfuerzos y deformaciones, modal y pandeo.

4.1.1 Comparación de resultados de esfuerzos

Al comparar los resultados de la simulación con los resultados obtenidos de expresiones analíticas, se encuentra que los valores hallados son muy parecidos, lo cual indica que el modelo utilizado en la simulación se asemeja a la realidad.

Tabla 4.1. Comparación de esfuerzos equivalentes (von Mises) en la zona de unión de los tramos II y III (figura 2.1)

	Analítico	Lineal	Sólido	Error (lineal)	Error (sólido)
Esfuerzo máximo	100.17 MPa	95.97 MPa	100 MPa	2.79%	0.17%
Montaje	97.12 MPa	-	100 MPa		2.96%

Adicionalmente también se compararon los valores de reacciones y tensiones en los cables obtenidos mediante simulación y método analítico.

Tabla 4.2. Reacciones obtenidas en el la torre

	Analítico	Lineal	Sólido	Error (lineal)	Error (sólido)
Reacción X	29.09 N	4.8987 N	11.867 N	83.16 %	59.20 %
Reacción Y	8290.9 N	8415.8 N	8841.6 N	1.5 %	6.64 %
Reacción Z	0 N	0 N	1.995 N	2 %	2 %
Tensión cable superior	5925.3 N	4908.7 N	4983.3 N	17.15 %	15.9%

Comparando los valores de la tabla 4.2, se pudo concluir que las fuerzas de reacción en Y son muy similares, y si bien **el error porcentual de las fuerzas en X es bastante grande**, en todos los casos la **reacción en X es de una magnitud mucho menor al compararla con la reacción en Y**.

La diferencia radica en la tensión en el cable, donde se tiene un error de 17%, sin embargo, en los demás parámetros, los errores son de menor magnitud, lo que indica que el modelo funcionará para los demás casos.

4.1.2 Comparación de resultados de pandeo

Para el caso de pandeo se puede apreciar (tabla 4.3) que existe una diferencia de 16% en las simulaciones, este porcentaje de error relativamente alto se pudo dar al asumir las condiciones de apoyo para la longitud equivalente en el cálculo por método de Euler.

Tabla 4.3. Comparación de resultados de pandeo.

	Analítico	Lineal	Error
Multiplicador de fuerza	21.488	18.038	16.06%

4.1.3 Comparación de resultados de análisis dinámico

Se compararon las frecuencias de los primeros modos de vibración, obtenidos mediante simulación y mediante métodos analítico. Se puede apreciar en la tabla 4.4 que los valores obtenidos de frecuencias naturales son muy parecidos con un error máximo de 19.3% en el modelo lineal, cuando en el modelo sólido el comportamiento es muy similar, y se puede observar en el pequeño error de 4.26%.

Tabla 4.4 Comparación de frecuencias naturales

	Analítico	Lineal	Sólido	Error lineal	Error solido
Frecuencia 1	1.3475 Hz	1.6071	1.4097	19.27 %	4.26 %
Frecuencia 2	1.3475 Hz	1.6076	1.4097	19.3 %	4.26 %

4.2 Comparación de resultados del eje principal

En el eje principal se encontraron distintos valores para cada una de las simulaciones de las diferentes uniones atornilladas. La mayor diferencia se encuentra al momento de comparar los esfuerzos cuando no se modela de ninguna forma el tornillo. Al simular el ensamble de esta manera se debe afinar la malla para poder apreciar los esfuerzos que se muestran con los otros métodos sin la necesidad de afinar la malla.

Tabla 4.5. Comparación de resultados de esfuerzos en el eje principal.

Esfuerzo equivalente (Von Mises)	
Nervios Inferiores Derechos	
Tornillo sólido	45.442
Sin Tornillo	20.882
Spider bolt	46.351
Apoyo de rodamiento cónico de rotor	
Analítico	37.85
Tornillo sólido	29.463
Sin Tornillo	30.394
Spider bolt	29.452

4.3 Comparación de resultados de eje tornamesa

Los resultados obtenidos en el eje del tornamesa dependieron mucho menos del tipo de unión atornillada usada. Puede darse debido a que esta pieza en particular no está unida a ninguna del ensamble simulado.

Tabla 4.6 Comparación de resultados en el eje del tornamesa

	Esfuerzo equivalente (Von Mises)		Desplazamiento max.	
	Valor (MPa)	Error (%)	Valor (mm)	Error (%)
Tornillo sólido	62.685	0%	0.046368	0%
Sin Tornillo	59.216	5.53%	0.046055	0.675%
Spider bolt	59.116	5.69%	0.046475	0.23%

4.4 Comparación de resultados de bocamasa de tornamesa

Tal como se dio en el eje principal, los resultados en la bocamasa difieren al aplicar los distintos tipos de uniones atornilladas, y una vez más, el resultado más alejado corresponde a la simulación sin tornillos.

Tabla 4.7 Comparación de resultados en la bocamasa del tornamesa

	Esfuerzo equivalente (Von Mises) Unión con brida.		Desplazamiento máximo	
	Valor (MPa)	Error (%)	Valor (mm)	Error (%)
Tornillo sólido	28.628	0 %	0.040488	0%
Sin Tornillo	11.321	60.45 %	0.040186	0.746%
Spider bolt	28.009	2.16 %	0.040577	0.219%

4.5 Comparación de resultados de la cola

Para realizar la validación de la cola se realizó la comparación de los resultados obtenidos por simulación tanto como con cálculo. Se puede observar que el valor de los esfuerzos se encuentra en el mismo orden y que además gracias al refuerzo de la cola, el momento de inercia de la sección transversal sube, reduciendo así el esfuerzo calculado.

Tabla 4.8 Comparación de resultados en la cola

	Esfuerzo equivalente (Von Mises) en unión con chasis	Desplazamiento máximo
	Valor (MPa)	Valor (mm)
Analítico	74.86	-
Tornillo sólido	56.457	26.492
Sin Tornillo	56.446	25.946
Spider bolt	56.445	26.533

4.6 Simulación de la primera propuesta de modificación

La primera propuesta de mejora consiste en la rotación de los cables alrededor del eje de la torre; de manera que al recibir el viento en la posición analizada existan dos cables funcionando a tracción, cada uno con una carga menor, reduciendo de esta manera los esfuerzos presentes (aproximadamente 1.41 veces) como se aprecia en la figura 4.2. Adicionalmente en la sección transversal de la zona más cargada, no existirá un concentrador de esfuerzos en el punto de esfuerzo normal máximo como se muestra en la figura 4.1.

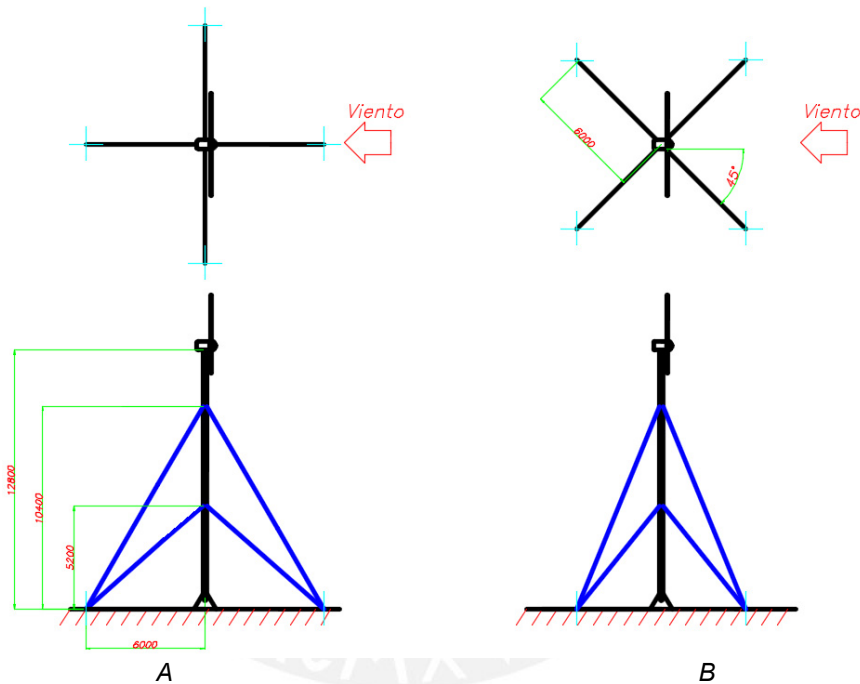


Figura 4.1. Configuraciones de los cables (azul) A) Configuración original B) Configuración propuesta.

La discretización y las condiciones de borde son las mismas que fueron consideradas en los anteriores análisis. Asimismo fue un problema no lineal. Luego de haber realizado la simulación se graficaron los resultados, encontrándose que el valor máximo de esfuerzos se redujo de manera significativa a 150 MPa como se muestra a continuación en la figura 4.2, siendo este valor aproximadamente 1.5 veces menor que el original, con lo que se confirma que al cambiar la orientación de los cables, se reducen los esfuerzos actuantes sobre las orejas.

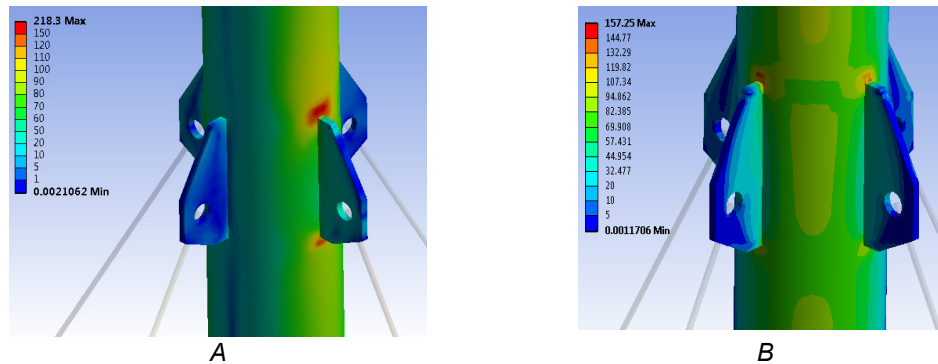


Figura 4.2. Comparación en los esfuerzos (MPa) al realizar el giro de los cables. A) Antes de realizar la modificación. B) Luego de la modificación.

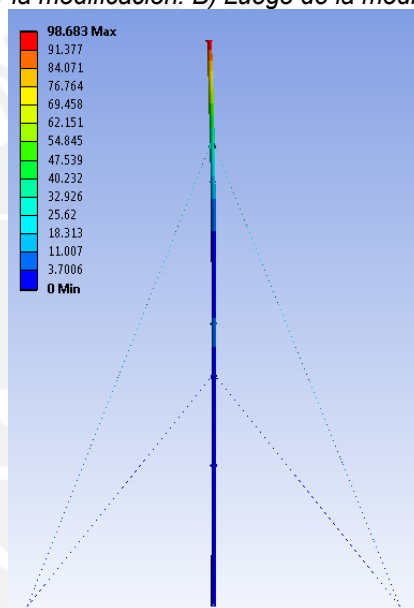


Figura 4.3. Desplazamientos en la torre con los cables girados. En milímetros.

4.7 Simulación de la segunda propuesta de modificación

La siguiente propuesta de mejora consiste en elevar la altura del juego de cables inferior, ya que de ocurrir la rotura o pérdida de tensión en alguno de los cables superiores, los cables inferiores no serían capaces de sostener la estructura, haciendo que esta falle y colapse (ver sección 3.8, capítulo 3) Esto sucedería incluso si se realiza el giro de 45 en la primera propuesta de modificación. Para lograr esto con la torre ya construida, se cambió el orden de ensamblado, invirtiendo los tramos 2 y 3 (Figura 4.4). Adicionalmente se mantienen los cables rotados en 45° para de esta manera reducir los esfuerzos.

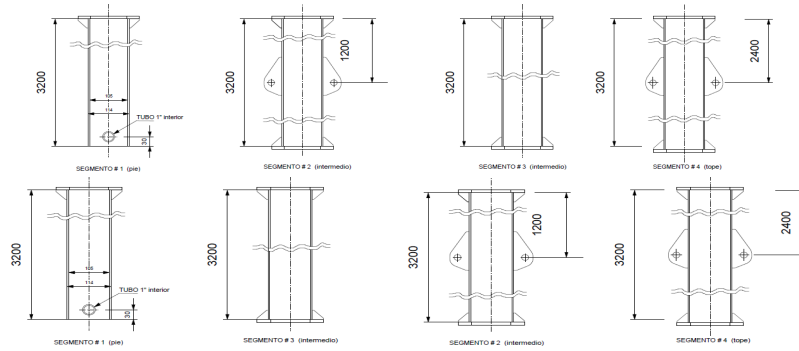


Figura 4.4. Cambio en el orden de los tramos 2 y 3 en el ensamble de la torre

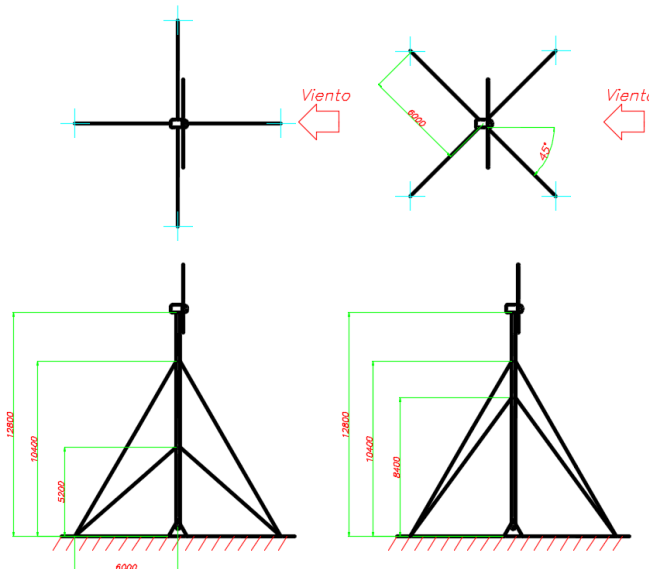


Figura 4.5. Nuevas dimensiones para los cables.

Se realizó una simulación con las mismas condiciones de borde y se obtuvieron resultados muy similares a la anterior simulación, sin embargo apareció un concentrador ficticio que eleva el valor de los esfuerzos en un punto pequeño y no será considerado.

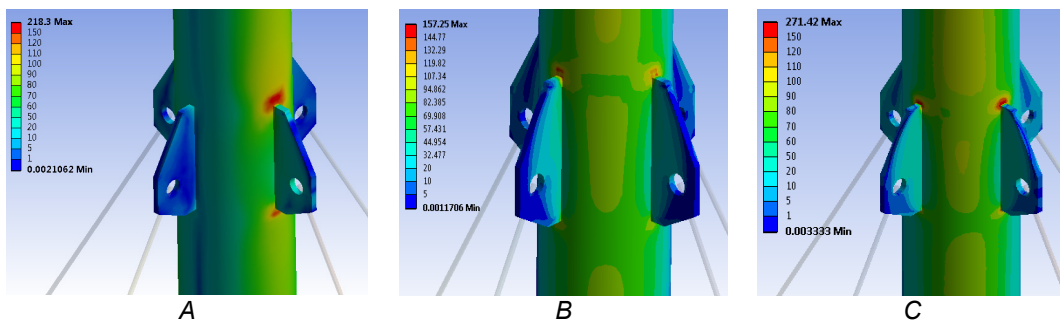


Figura 4.5. Comparación en los esfuerzos (En MPa) en la torre. A) Original B) Ensamble con cables girados. C) Ensamble con cables girados y cables inferiores a mayor altura

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- El estudio analítico de los distintos componentes estructurales es un paso importante en el desarrollo del trabajo ya que posibilita el entendimiento y planteamiento del problema y cuyos resultados son tomados como valores referenciales para las simulaciones posteriores.
- El procedimiento de simulación numérica, que consiste en el desarrollo de modelos simplificados lineales y sólidos, y su posterior validación mediante comparación con los valores analíticos, fue de gran utilidad ya que permitió extender las simulaciones a diversas condiciones de carga y mejoras del diseño actual.
- Al comparar los resultados obtenidos por distintos métodos (figura 5.1) se puede observar que a pesar del reducido tiempo de simulación del modelo lineal, este no ofrece resultados detallados como de la distribución de esfuerzos (figura 5.1A); en cambio, con el modelo sólido sí se obtienen resultados detallados (figura 5.1B) y con comportamiento similar al teórico (figura 5.1C). En las imágenes mencionadas se aprecia desde el eje neutro de una sección transversal, hasta los esfuerzos normales máximos de la sección

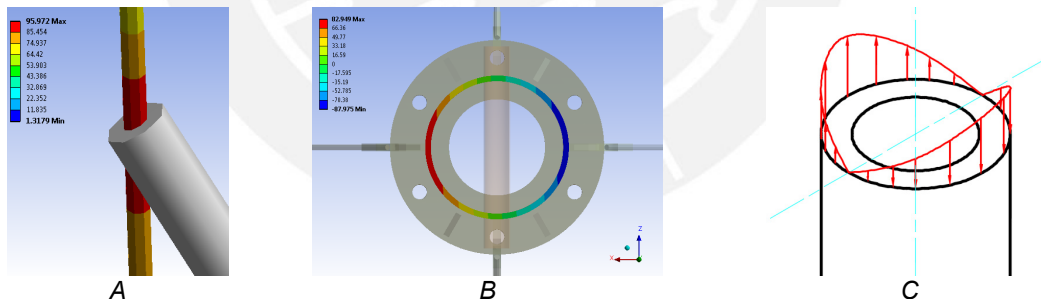


Figura 5.1. Comparación en las distribuciones de esfuerzo normal obtenidas mediante distintos métodos. A) Modelo lineal. B) Modelo sólido. C) Modelo teórico.

- Luego de realizar diversas simulaciones se encontró que un factor que influye de gran manera el tiempo de solución es el número de ecuaciones de restricción (Constrain Equations), las cuales fueron utilizadas para relacionar los cables con las caras a las cuales están atados. Con una cantidad de CE como en la figura 5.2A, se realizó la simulación en aproximadamente 8 horas, mientras que aumentando la cantidad de CE como se ve en la figura 5.2B el tiempo de simulación se incrementó a 84 horas aproximadamente.

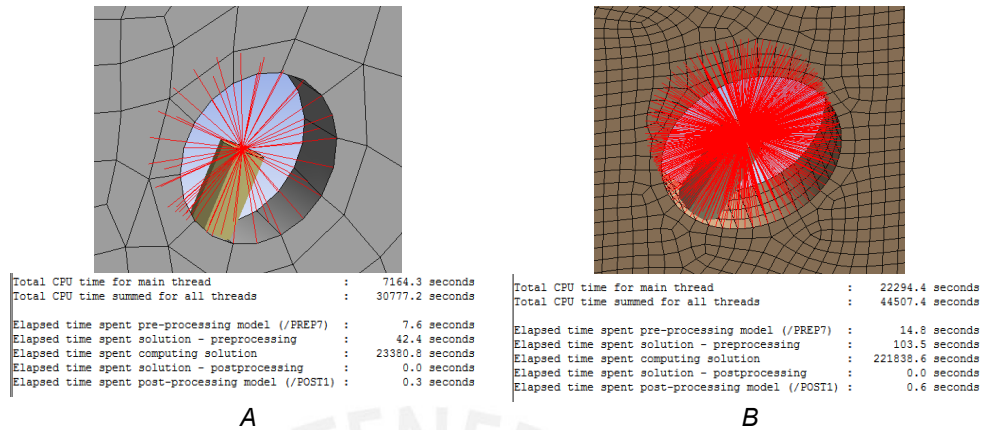


Figura 5.2. Comparación en tiempo de simulación al agregar un mayor número de CE. Cada una de las CE relaciona al nodo del extremo del cable con un nodo en la cara de la oreja de la torre a la que va atada.

- En las simulaciones donde existan uniones atornilladas se recomienda modelar los tornillos como modelos sólidos o *spiderbolt*, ya que no modelarlos puede afectar de manera negativa la simulación al evitar que se muestren esfuerzos que actúan en otras áreas, y para poder apreciarlos en simulaciones sin pernos se tendría que usar un tamaño de elemento muchísimo más pequeño, aumentando así el tiempo de simulación e invirtiendo una mayor cantidad de recursos computacionales.
- Durante la experiencia de las simulaciones se pudo observar y comprobar la utilidad de crear pequeños modelos (fáciles de validar) para comprobar el funcionamiento de ciertas herramientas del software. La mencionada práctica resulto de utilidad para poder aprender la aplicación de los elementos finitos usados para modelar los cables.
- Se observó que el error porcentual en los desplazamientos siempre es menor que el error en los esfuerzos al simular el mismo elemento de diversas formas (ver tablas 4.6, 4.7, 4.8). Esto se debe a que el software resuelve e interpola desplazamientos, y deriva el desplazamiento para obtener la deformación (y por ende esfuerzos).

CONCLUSIONES

- Se determinaron las distintas cargas que actúan sobre el aerogenerador, así como su influencia. Dichas cargas son el peso de los diversos componentes, el empuje del viento sobre las palas, el empuje del viento sobre la estructura y la carga sísmica. De las cargas mencionadas se encontró que las que poseen mayor influencia son el empuje del viento sobre las palas y la carga sísmica, las cuales son responsables de casi el 95% de la intensidad de los esfuerzos sobre la estructura.
- Mediante la comparación de los resultados por simulación con respecto a los resultados analíticos de la torre, se obtuvo un error porcentual de 2.79% y 0.17% para el modelo lineal y sólido respectivamente, quedando de esta manera validados los modelos utilizados. Mientras que los resultados del chasis, tornamesa, eje principal y cola, mostraron un mayor error porcentual de hasta 6%.
- Los resultados para la condición actual de la torre arrojan esfuerzos equivalentes de 225 MPa en la unión de las orejas superiores a la torre, próximos al límite de fluencia del material. En caso se eleve el empuje del viento 1.6 veces como indica el método LRFD, dichas uniones alcanzarían esfuerzos de hasta 350 MPa. En caso de que esta unión (o el cable superior) falle, la unión de los cables inferiores y grandes regiones de la torre estarían sometidas a 500 MPa y de 350 a 400 MPa, respectivamente; lo cual indicaría el colapso de la torre, siendo los cables inferiores insuficientes para mantener la torre en su posición de trabajo.
- El estudio de pandeo lineal realizado a la torre del aerogenerador indica que no existirán problemas de estabilidad ya que se requiere que las fuerzas actuales se incrementen 20 veces para provocar una falla por pandeo.
- El análisis modal realizado a la torre arrojó frecuencias naturales de 1.41 Hz, 7.33 Hz y 9.6 Hz (primeros tres modos), los cuales no coinciden con la frecuencia de funcionamiento nominal de 5 Hz, indicando que la estructura esta fuera de la zona de resonancia.
- El análisis del proceso de izaje reveló que no es necesario el uso de un cable auxiliar en el izaje, debido a que los esfuerzos que se dan durante el izaje

(100 MPa) son muy similares a los que se dan en el funcionamiento nominal del aerogenerador.

- La primera propuesta de modificación la cual consiste en realizar el giro de 45° del arreglo de cables, reduce efectivamente los esfuerzos sobre las uniones superiores de los cables (el máximo se reduce a 150 MPa); sin embargo, de fallar una de estas y soltarse el cable, el colapso sería inminente. Por lo tanto, se realizó una segunda propuesta de modificación, la cual consiste en subir los cables inferiores. Al realizar esta modificación y bajo el escenario de una eventual falla de los cables superiores, la unión de los cables inferiores estaría sometida a un esfuerzo máximo de 270 MPa, los cuales si bien exceden el límite de fluencia, no exceden el esfuerzo de rotura y la torre no colapsaría de forma inmediata.
- En las simulaciones realizadas, se emplearon modelos sencillos y simplificados con los cuales, al igual que con los métodos analíticos, se logró conocer el comportamiento global del sistema. Al utilizar modelos sólidos se logró estudiar los detalles constructivos sin la necesidad de cálculos de gran complejidad. Un claro ejemplo fueron las orejas del aerogenerador

BIBLIOGRAFIA

- [1] HAU, Erich
2013 *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics.*
3ra edición. Londres: SPRINGER. Pag. 98
- [2] FEI CHAOYANG. WANG NAN. ZHOU BO. CHEN CHANGZHENG.
2004 *Dynamic performance investigation for large-scale wind turbine tower.*
Shenyang, China.
- [3] GALVEZ, Raquel
2005 *Diseño y Cálculo Preliminar de la torre de un aerogenerador.* Proyecto
de fin de carrera Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica. Madrid:
Universidad Carlos III Madrid. Departamento de Mecánica de medios
continuos y teoría de estructuras. Consulta: 30/04/2013 [http://e-
archivo.uc3m.es/bitstream/10016/12046/1/PFC_Raquel_Galvez_Roman
_2005.pdf](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/12046/1/PFC_Raquel_Galvez_Roman_2005.pdf)
- [4] HAU, Erich
2013 *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics.*
3ra edición. Londres: SPRINGER. Pag. 220
- [5] HAU, Erich
2013 *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics.*
3ra edición. Londres: SPRINGER. Pag. 171
- [6] LAVASSAS I. NIKOLAIDIS G. ZERVAS P. EFTHIMIOU E. DOUDOUMIS I N.
BANIOTOPULOS C C.
2003 *Analysis and design of the prototype of a steel 1MW wind turbine tower.*
Thessaloniki.
- [7] MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO
2006 *Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma Técnica E.020 – Cargas.*
Lima, Perú.
- [8] SAN BARTOLOMÉ, Angel
2007 *Defectos que incidieron en el comportamiento de las construcciones de
albañilería en el sismo de pisco del 15-08-2007.* PUCP.
- [9] MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO
2006 *Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma Técnica E.030 –Diseño
Sismoresistente.* Lima, Perú.
- [10] RODRIGUEZ, Jorge
2011 *Resistencia de Materiales 2.* Lima: PUCP.
- [11] THOMSON, William
1982 *Teoría de Vibraciones: Aplicaciones.* Prentice-Hall Hispanoamérica :
México.

- [12] YOUNG W. BUDYNAS R.
2002 *Roark's formulas for Stress and Strain*. 7ma edición. Nueva York: McGraw-Hill.
- [13] ANSYS Inc.
2014 *ANSYS Meshing Users Guide*
- [14] ANSYS Inc.
2014 *ANSYS Theory Reference – Structural reference*
- [15] ALENCASTRE, Jorge
2013 *Apuntes del curso Vibraciones*. Lima: PUCP
- [16] GERSTOFT P. DAVENPORT A.G
1986 *A simplified method for dynamic analysis of a guyed mast*. Amsterdam.
- [17] WAHBA, Yohanna
1999 *Static and dynamic analyses for guyed antenna towers*. University of Windsor. Ontario, Canada.
- [18] MONTGOMERY, Jerome
2002 *Methods for modeling bolts in the bolted joint*. Siemens Westinghouse Power Corporation, Orlando, Florida, US.
- [19] YUPA, Renatto
2014 *Informe técnico: Análisis estructural y modal de la hélice de un aerogenerador de 3kW en condiciones extremas de funcionamiento*. PUCP.
- [20] CORTEZ, Miguel
2014 *Informe técnico: Análisis aerodinámico de la hélice de un aerogenerador de 3kW mediante simulación numérica*. PUCP.
- ZIENKIEWICZ, O.C
2005 *The finite element method: Its basis and fundamentals*. ELSEVIER.
- DAE KUN KWON. KAREEM A. BUTLER K.
2012 *Gust front loading effects on wind turbine tower systems*. Boston, USA.
- LAVAYEN, Daniel
2014 *Informe técnico: Análisis estructural de los componentes mecánicos de un aerogenerador de 3kW mediante simulación numérica*. PUCP.