

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

TRABAJO DE DIPLOMA

Análisis estructural de una torre para aerogeneradores de baja potencia, mediante el método de elemento finito para la fábrica de Antenas.

Autor: José Ernesto Fernández López

Tutor: Ing. Jorge Luis Díaz López

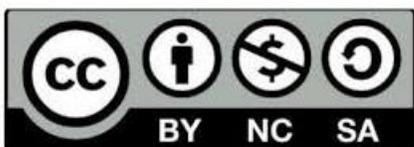
Co-Tutor: Ing. Ángel Joaquín Cabrera Pérez

Santa Clara, Julio del 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Dedicatoria

*Todo mi esfuerzo y dedicación a la hora de realizar este trabajo
va dedicado en conjunto con todo mi amor, a mis padres.*

Agradecimientos

A mis padres, por su paciencia, esfuerzo, amor y apoyo incondicional.

A mi hermano por darme su apoyo incondicional en todo momento.

A toda mi familia, por apoyarme durante estos cinco años.

A mis tutores Ing. Jorge Luis Díaz López y Ing. Andy Rivero Fleites, Ricardo Arañon por su paciencia, su preocupación, y sobre todo por ser más que tutores, tres buenos amigos.

A mi amiga y compañera Betty, por todo su amor y paciencia para la realización de este proyecto.

A todos mis amigos, por brindarme su apoyo en todo momento.

Resumen

En gran medida el desarrollo tecnológico se ha enfocado en hacer uso de la energía eólica mediante los aerogeneradores de baja potencia. En función de esta idea se realiza una evaluación por el método de elementos finitos, del diseño de una torre para aerogeneradores de baja potencia, que permita su fabricación tanto técnica como económica en la empresa de Antenas. Inicialmente se consulta el estado del arte en cuanto al diseño de los aerogeneradores de baja potencia, seleccionando el tipo de torre a evaluar. Se calculan las cargas actuantes y la carga de viento extremo que influye sobre la estructura. Se determina el material de la torre, así como el proceso de soldadura a utilizar. Finalmente se valorar la resistencia mecánica, rigidez y resonancia de la estructura a partir de la simulación.

Abstract

The wind energy is the best choice for the use of wind turbine. We need to value the possibility of produce wind turbine towers in Antena's Factory. At the beginning, there is an investigation about the different classification of wind turbine, and we chose the best tower for the evaluation. After that we calculate the right charges for the tower, and after that we do the simulation. Finally, we choose the appropriate material for the tower and the best manufacturing process. After the simulation, we value the strength, the stiffness and the resonance of the wind turbine tower.

TABLA DE CONTENIDOS

<i>Dedicatoria</i>	iii
<i>Agradecimientos</i>	iv
<i>Resumen</i>	v
Capítulo 1. Antecedentes, características generales y principales tecnologías de aerogeneradores.....	3
1.1 Caracterización de la fuente de energía. El viento.....	3
1.2 La energía eólica en Cuba y en el mundo	5
1.3 Potencial Eólico	7
1.4 Tipos de aerogeneradores	9
1.4.1 Aerogeneradores de eje horizontal HAWT	9
1.4.2 Aerogeneradores de eje vertical VAWT.....	9
1.5 Antecedentes de los aerogeneradores en Cuba	10
1.6 Clasificación según la posición del equipo con respecto al viento.....	11
1.7 Clasificación según el número de palas	12
1.8 Estudio de alternativas. Tipos de torres	14
1.9 Conclusiones Parciales	19
Capítulo 2: Modelado de la Torre.....	20
2.1 Modelado de la torre: Software utilizado	20
2.2 Geometría y Tipología.....	20
2.3 Condiciones de apoyo estructura suelo.....	22
2.3.1 Cimentación.....	22
2.3.2 Unión estructura suelo.	23

2.4 Vínculos entre los elementos	23
2.5 Determinación de las cargas actuantes sobre la estructura	24
2.5.1 Carga del peso del aerogenerador	24
2.5.2 La carga del viento	25
2.5.3 Cargas producidas por el viento sobre el aerogenerador	27
2.6 Material	27
2.7 Proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW)	28
2.7.1 Electrodo A5.18 según AWS	30
2.8 Estudios a realizar en la torre	30
2.9 Conclusiones parciales	32
Capítulo 3: Resultados de la simulación de la torre	33
3.1 Software utilizado	33
3.2 Implementación de las cargas en la estructura	33
3.3 Restricción del modelo	35
3.4 Mallado de la torre	35
3.5 Análisis de los resultados	37
3.6 Conclusiones Parciales	43
Conclusiones Generales	44
Recomendaciones	45
Referencias bibliográficas	46

Introducción

Las energías renovables suponen una ventaja principal para el sector industrial, estas son limpias e inagotables y ofrecen una alternativa a la producción convencional de energía. Es interesante desarrollar este propósito porque no sólo solventa en gran medida las consecuencias negativas medioambientales, sino que también resuelve la problemática del aumento del consumo energético.

La energía eólica es la más importante de entre todas las renovables, puesto que es la que más tiempo lleva en desarrollo y presenta un mayor crecimiento. La tecnología para el aprovechamiento de la energía del viento ha tenido un extraordinario avance en los últimos veinte años. La energía eólica une a sus características de renovable y no contaminante, la importancia de ser a nivel planetario la más considerable, ya que tiene un alto potencial de aplicación como recurso energético, en aquellas áreas que cuentan con el viento necesario para permitir su aplicación.

La forma típica de aprovechar esta energía es a través de la utilización de aerogeneradores o turbinas de viento. El aerogenerador es el sistema ideado para la producción de energía a partir del uso de la energía del viento. El aprovechamiento eólico lleva en uso desde hace varios cientos de años, desde las aplicaciones en navegación hasta los distintos tipos de molinos utilizados para moler grano. Gracias a este desarrollo a lo largo de los años, las técnicas de hoy día permiten un máximo aprovechamiento de la energía eólica en los aerogeneradores.

La torre de un aerogenerador es de vital importancia puesto que es el soporte del sistema. Esto significa que tiene que ser capaz de sostener toda la estructura, aguantando las cargas del viento y los esfuerzos que se producen en la torre a consecuencia de éste. La torre ha de ser lo más ligera posible, debe ser de fácil construcción, manejo e instalación.

La Empresa de Antenas de Santa Clara necesita realizar un estudio para valorar la posibilidad técnica y económica de construir torres para el montaje de pequeños aerogeneradores de la forma más adecuada.

Problema Científico:

¿Cuál es la factibilidad de fabricar torres para el montaje de pequeños aerogeneradores, que soporten las condiciones críticas del tiempo?

Objetivo General:

Evaluar el dimensionamiento y material de la torre de un aerogenerador de baja potencia a partir del modelado y la simulación para ver si soporta en condiciones críticas de uso la velocidad máxima del viento.

Objetivos Específicos:

- Constatar el estado del arte en el diseño de aerogeneradores de baja potencia en Cuba y en el mundo.
- Definir las cargas actuantes y la carga de viento extremo que influye sobre la estructura para realizar una simulación lo más real posible a partir del modelado.
- Determinar el material más adecuado para la torre, así como el proceso de soldadura a utilizar en dependencia a la factibilidad técnica y económica que permita su fabricación en la empresa de Antenas.
- Valorar la resistencia mecánica, rigidez y resonancia de la estructura a partir de la simulación.

Capítulo 1. Antecedentes, características generales y principales tecnologías de aerogeneradores.

En este capítulo se realiza una breve revisión bibliográfica sobre la energía eólica en Cuba y en el mundo. Se da a conocer las posibles zonas a instalar el aerogenerador y se abordan los diferentes criterios de clasificación de los aerogeneradores, así como sus antecedentes en Cuba. Se estudian las diferentes tipologías de torres y sus tendencias actuales.

1.1 Caracterización de la fuente de energía. El viento

El viento surge como consecuencia del desigual calentamiento de la superficie terrestre, siendo la fuente de energía eólica, que a su vez es un recurso energético renovable, limpio y gratuito. [1]

La Tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento, la energía eólica posee muchas ventajas, pero cuenta también con los grandes inconvenientes de ser dispersa y aleatoria. Bajo la acción de la presión, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento [2]

Se estima que la energía contenida en los vientos es aproximadamente el 2% del total de la energía solar que alcanza la tierra, lo que supone casi dos billones de toneladas equivalentes de petróleo al año (200 veces mayor de la que consumen todos los países del planeta), aunque en la práctica solamente podría ser utilizada una parte muy pequeña de esa cifra, por su aleatoriedad y dispersión, del orden del 5%. La cantidad de energía que ello representa hace de la energía eólica una de las fuentes de energía renovables con mayor potencial.

Las diferencias de insolación entre distintos puntos del planeta generan diferentes áreas térmicas, y los desequilibrios de temperaturas se traducen en variaciones de presión. El aire, como cualquier gas, se mueve desde las zonas de alta presión a las de baja presión. Durante el día, el agua de los océanos permanece relativamente más fría que la superficie terrestre. De la radiación solar que incide sobre la

superficie del agua se emplea parte en calentamiento, y parte en evaporación; pero debido a la gran capacidad del agua para absorber calor, la temperatura en las capas superficiales apenas varía y lo mismo ocurre con la temperatura del aire que se encuentra en contacto con ellas. Sobre la tierra, en cambio, la radiación solar que se recibe sobre el suelo se traduce en una elevación de la temperatura, tanto de la corteza terrestre como del aire circundante. El aire caliente se dilata, pierde presión y es remplazado por el aire fresco que viene del mar. Durante la noche el ciclo se invierte. La corteza se enfría más rápidamente, mientras que el agua del mar conserva mejor el calor acumulado a lo largo del día. En las montañas ocurre un proceso parecido. Unas laderas reciben más insolación que otras, en función de su orientación y pendiente. El calentamiento del suelo es desigual, y los desplazamientos del aire tienden a compensar las diferencias de presión.[3]

El viento se caracteriza por dos grandes variables respecto al tiempo: la velocidad y la dirección. La velocidad incide más directamente que la dirección en el rendimiento de la estación.[4, 5]

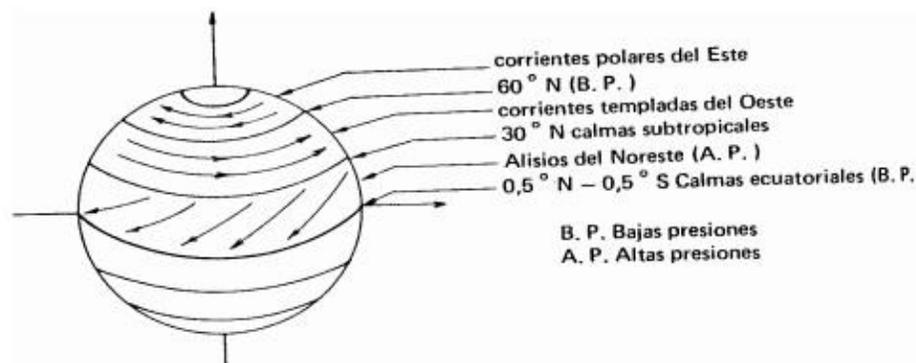


Figura 1.1 Circulación general de los vientos medios a nivel del suelo y en el hemisferio norte.[5]

En la velocidad del aire se hallan otros factores que se deben tener en cuenta para un mejor uso de la energía eólica:

- La rugosidad del terreno: Los terrenos lisos y despejados como superficies de agua, llanuras sin arboles producen una variación suave al contrario de las superficies accidentadas, como edificaciones urbanas, terrenos boscosos, etc.

- El relieve del terreno: Las elevaciones del terreno, tales como montañas, colinas, acantilados, etc., pueden ocasionar un aumento de velocidad si el perfil es de forma y pendiente suave o pueden disminuir la velocidad si se trata de fuertes pendientes, crestas o bordes agudos.
- Presencia de obstáculos: Los obstáculos, como edificios, arbolado o accidentes del terreno, provocan en general dos efectos desfavorables: una disminución de la velocidad del viento y un aumento de las turbulencias.

1.2 La energía eólica en Cuba y en el mundo

La instalación mundial de la energía eólica creció un 44% en 2014, hasta situarse en 51,477 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC), China, Estados Unidos, Alemania y España son los primeros productores mundiales.[6]

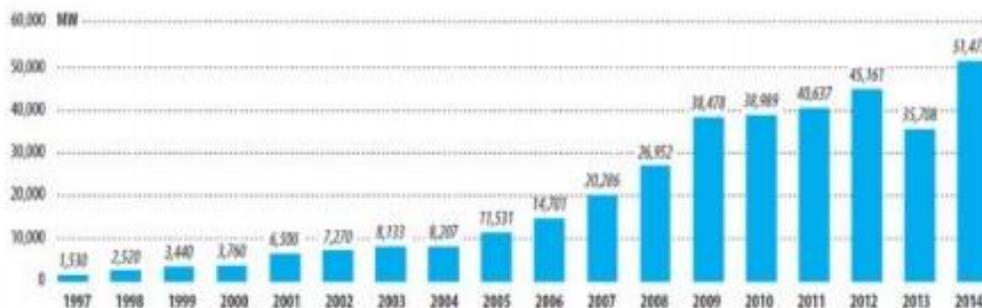


Gráfico 1: Potencia eólica anual instalada en el mundo 1997-2014[6]

La energía eólica se está volviendo más popular en Cuba, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

El gobierno cubano, inmerso en la introducción de alternativas energéticas ante los desmesurados precios del petróleo, ha dado pasos firmes para el desarrollo de la energía eólica. Durante los últimos años, gracias al trabajo de varias instituciones, se realizaron algunos proyectos piloto de desarrollo eólico que le permiten al país contar actualmente con una capacidad instalada de 480 kW

Con el paso de los años se han creado numerosos centros investigativos en el país que se dedican al desarrollo y divulgación del uso de la energía eólica mediante aerogeneradores.

Entre los que se encuentran: Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) de Santiago de Cuba; Centro Integrado de Tecnología Apropriada (CITA) de Camagüey; Centro de Estudios de Energías Renovables (CETER), del Instituto Superior “José Antonio Echeverría” (ISPJAE); Grupo de Energía Solar de La Habana y el Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA), de la Universidad Central de Las Villas (UCLV). [7]

Estos centros investigativos profundizan en la toma de conciencia sobre la importancia de incrementar el acceso sostenible a la energía, la eficiencia energética y la energía renovable en el ámbito local, nacional, regional e internacional.

1.2.1 Ventajas de la energía eólica

- Es renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos.
- Es limpia ya que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.
- No requiere combustión, es decir que no genera emisiones de dióxido de carbono, por lo que no contribuye al incremento del efecto invernadero ni al cambio climático.
- Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo, en zonas desérticas, próximas a la costa, en zonas áridas y muy empinadas para ser cultivables.
- Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la auto alimentación de viviendas, terminando así con la necesidad de conectarse a la red eléctrica.

1.2.2 Desventajas de la energía eólica

- Comparada con las fuentes convencionales de energía, principalmente con la conexión a red, la eólica presenta costos elevados, sobre todo si se tiene en cuenta la inversión inicial.

- Al utilizar como recurso energético el viento, se debe considerar que esté no es constante, por lo que no es recomendable utilizarla como única fuente de energía. A pesar de ello, gracias a los bancos de baterías desarrollados recientemente, la autonomía de los equipos eólicos domésticos ha aumentado en gran medida.

1.3 Potencial Eólico

Para la determinación del potencial eólico es necesario disponer de una información meteorológica. Para esto es preciso realizar medidas de velocidad de viento, dirección, temperatura y presión para elaborar el mapa de recursos eólicos de las distintas zonas en el área de estudio.

El Mapa del Potencial Eólico de Cuba permite identificar 26 zonas geográficas, que revelan potenciales eólicos, con potencias que van desde 500 hasta 600 W/m² y velocidades entre 6,2-6,8 m/s. A partir de la determinación de la extensión en kilómetros cuadrados de las áreas consideradas entre moderadas y excelentes se determinó el potencial eólico de Cuba, está entre 5 000 y 14 000 MW.

Una de las zonas más factibles para la instalación del aerogenerador de baja potencia es en la provincia de Santiago de Cuba (ver figura 1.2), donde existen potenciales altos, principalmente en las áreas costeras y 14 numerosas áreas con alto potencial eólico situadas en la Sierra Maestra y en la cordillera de la Gran Piedra.[8]

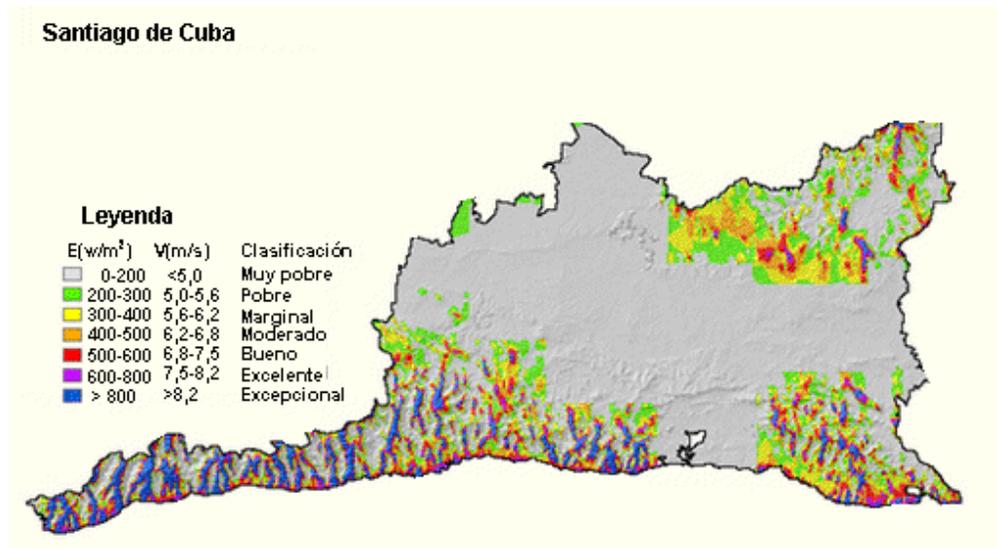


Figura 1.2 Zonas con buen potencial eólico en la provincia de Santiago de Cuba

A partir de esta determinación se planea instalar el aerogenerador de baja potencia en la zona de Gran Piedra, Santiago de Cuba (ver figura 1.3), donde existe un buen potencial eólico para su desempeño.



Figura 1.3 Ubicación Zona Gran Piedra, Santiago de Cuba

1.4 Tipos de aerogeneradores

El aerogenerador es un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento, en energía mecánica a través de una hélice y en energía eléctrica gracias a un alternador.

En función de la orientación del eje de giro de la máquina eólica se encuentran dos grandes grupos:

- Aerogeneradores de eje vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)
- Aerogeneradores de eje horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)

1.4.1 Aerogeneradores de eje horizontal HAWT

Los aerogeneradores de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) se construyen con un rotor tipo hélice con el eje dispuesto en posición horizontal.

Este tipo de aerogeneradores tiene que orientarse con la dirección del viento de forma que el eje de giro del rotor se encuentre situado paralelamente a la dirección del viento, además tienen una mayor eficiencia energética debido en parte a la utilización de perfiles alares en sus palas y alcanzan mayores velocidades de rotación.

1.4.2 Aerogeneradores de eje vertical VAWT

Un aerogenerador de eje vertical tiene el eje del rotor en posición vertical, lo que le permite generar energía eléctrica sin importar la dirección del viento. Son muy simples y de bajo costo. Son tecnologías abundantemente utilizadas a nivel global donde se da más importancia al costo que a la eficacia. Una de las principales ventajas de los aerogeneradores de eje vertical es que no necesitan un sistema de orientación al ser omnidireccional, además la gran mayoría de los componentes mecánicos y de mayor masa como el generador van instalados al suelo, dotando al aerogenerador de una mayor estabilidad al descender el centro de gravedad, también proporciona una facilidad para su mantenimiento y a su vez disminuyen los costos de montaje.

1.5 Antecedentes de los aerogeneradores en Cuba

1.5.1 Período de 1899 a 1958

En la primera mitad del siglo XX, las llanuras camagüeyanas alcanzaron su esplendor ganadero con los molinos de viento como tecnología energética eficiente y eficaz. En otras zonas, principalmente la oriental, proliferaron las máquinas eólicas para el abasto de agua a la ganadería, el riego a pequeñas parcelas y el suministro de agua potable a bateyes y comunidades.

Probablemente en Camagüey funcionó la primera fábrica de estos equipos, a imagen y semejanza de los afamados molinos de viento americanos (American Farm Windpump), que afianzó una tradición fabril hasta los años noventa. El éxito de estos molinos fue tal que entre los hacendados y ganaderos camagüeyanos su presencia en las fincas y haciendas constituía símbolo de prosperidad.



Figura 1.4 Aerogenerador americano multipala, usado en el abasto de agua.

Por otro lado, el auge alcanzado por los aerogeneradores tipo Windcharger facilitó la instalación de algunos equipos en fincas y residencias cubanas, pero han quedado muy pocas huellas de su existencia. Estas máquinas formaron parte del relativo desarrollo alcanzado por la energía eólica en el mundo después de la Segunda Guerra Mundial y estaban constituidas por un rotor de dos palas y un sistema de regulación mediante freno aerodinámico.

1.5.2 Período de 1990 a 2004

Entre las tareas que entonces se formularon se destacan la reparación y mantenimiento de los molinos de viento instalados, la continuidad de la producción en las fábricas de molinos de viento existentes, la evaluación técnica y económica de varios modelos, la adquisición de un sistema avanzado de bombeo como instalación demostrativa, la puesta en operación de los aerogeneradores existentes y la instalación de un parque eólico de 1 MW en Santa Cruz del Norte.

1.6 Clasificación según la posición del equipo con respecto al viento.

Los aerogeneradores se pueden clasificar por la posición del equipo con respecto al viento en:

- **Rotor orientado a barlovento**

Las máquinas con rotor a barlovento (ver figura 1.5) tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de este diseño es que se evita el abrigo del viento tras la torre. Esto se traduce en menores cargas de fatiga, y disminución de ruidos. La gran mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño.

- **Rotor orientado a sotavento**

Se denomina así cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento. La ventaja teórica que presentan estas máquinas es que pueden ser construidas sin un mecanismo de orientación.



Figura 1.5 Posición del equipo con respecto al viento a) barlovento b) sotavento.

1.7 Clasificación según el número de palas

- **Monopala**

Estos diseños no están muy extendidos comercialmente, porque además de una mayor velocidad de giro, y de los problemas de ruido y de intrusión visual, necesitan un contrapeso en el lado del buje opuesto a la pala que equilibre el rotor. Por supuesto esto anula el ahorro de peso comparado con un diseño bipala.



Figura 1.6 Aerogenerador horizontal monopala

- **Bipala**

Los aerogeneradores bipala tienen la ventaja de ahorrar el costo de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, presentan la desventaja de necesitar de una mayor velocidad de giro para generar la misma energía de salida. Debido a la variación de la velocidad del viento con la altura y que el rotor solo dispone de dos palas se generan en el rotor mayores inestabilidades que en los rotores tripala.



Figura 1.7 Aerogenerador horizontal bipala

- **Tripala**

Es el más empleado en la actualidad, consiste en tres palas colocadas formando un ángulo de 120° entre sí.

Los aerogeneradores de tres palas tienen velocidades de rotación relativamente bajas, lo son también las de punta de pala. Una de las muchas razones para la utilización del aerogenerador tripala es que trabajan de forma silenciosa y por la distribución de las palas la góndola está equilibrada proporcionando la estabilidad del aerogenerador.



Figura 1.8 Aerogenerador horizontal tripala

- **Multipala**

Los aerogeneradores multipala todavía conservan algún parecido con los antiguos molinos multipala que se usaban para bombear agua de los pozos.

Los nuevos modelos son cada vez más estéticos sin perder eficiencia (ver figura 1.9). Estos se denominan Wind Dancer y poseen una turbina eólica de uso residencial de 8 aspas que ofrece un buen rendimiento, especialmente para lugares con vientos sin mucha fuerza, y además es silenciosa. Estos aerogeneradores se caracterizan por girar a bajas velocidades y ofrecer un par mayor.



Figura 1.9 Aerogenerador horizontal multipala

1.8 Estudio de alternativas. Tipos de torres

El hecho de buscar mayores alturas de las torres, ha provocado cambios en los materiales de construcción de las mismas. Este cambio se debe principalmente al intento por conseguir torres que sean capaces de soportar cargas a las que serán sometidas, pero buscando siempre el menor costo posible. Cada tipo de torre tendrá unas ventajas y desventajas; desde la mayor o menor dificultad de fabricación hasta el montaje, y la durabilidad.

Torre de celosía

El método más simple para construir una alta y rígida torre, es una celosía tridimensional (ver figura 1.10). Este tipo de torre consiste en una estructura metálica en la que se sustenta el rotor eólico y los componentes mecánicos de la transmisión. Las torres de celosías continúan siendo el modelo más empleado para el montaje de pequeños aerogeneradores. Presentan la ventaja de tener un costo reducido, pero tienen una accesibilidad compleja que dificulta las tareas de mantenimiento. El impacto visual de las torres de celosía es elevado a distancias cercanas a la torre.



Figura 1.10 Torre de celosía

- **Torre de hormigón**

La configuración de la estructura de la torre de hormigón (ver figura 1.11) se puede realizar o bien con hormigón armado u hormigón pretensado.

El hormigón pretensado es más caro, pero presenta mejores características para los diseños de torres de elevada rigidez que los hormigones armados, además es una opción económicamente competitiva con las torres tubulares de acero cuando éstas se han de diseñar con elevada rigidez. Tener que construir la torre en el emplazamiento de operación con el usual método de entablado es frecuentemente considerado una desventaja de la construcción del hormigón. Por esta razón, en algunos casos se usan torres de hormigón prefabricadas producidas en 2 o 3 secciones por máquinas especiales en fábrica.



Figura 1.11. Torre de hormigón

- **Torre tubular de acero atirantada**

Las máquinas con rotor a sotavento permiten torres tubulares de acero más esbeltas. Éstas son ancladas al suelo con cables de acero, en algunos casos con tirantes rígidos para soportar la rigidez a flexión requerida. Las torres tubulares de acero atirantadas, (ver figura 1.12) son usadas para rotores a sotavento, particularmente cuando la altura de la torre es muy grande comparada con el diámetro del rotor. A pesar de su relativa masa global pequeña, las torres atirantadas no tienen muy buena relación costo- eficiencia. Los tirantes y los anclajes requeridos en adición aumentan el costo total.



Figura 1.12 Torre tubular de acero atirantada.

- **Torre tubular de acero**

Este tipo de torre es el más utilizado en la actualidad (ver figura 1.13). Precisan una instalación más complicada y cara, pero ofrecen una mayor resistencia y necesitan un menor mantenimiento que las torres de celosía. Las nuevas torres tubulares de acero se diseñan de tal forma que la frecuencia natural de flexión es inferior a estas frecuencias de giro de las palas.

El criterio de fabricación más sencillo de las torres tubulares es mediante la unión de varias secciones cilíndricas. El número de secciones habitual suele ser dos o tres, para alturas de torres superiores a 60 metros. En las torres de elevada altura el diseño suele ser tronco- cónico con chapa de acero de espesor decreciente con la altura para reducir peso.



Figura 1.13 Torre tubular de acero.

- **Torres híbridas**

Son torres compuestas por una parte fabricada con hormigón y la otra con acero. El objetivo de realizar esta mezcla consiste principalmente en abaratar costos respecto a las de hormigón totalmente, montando parte de la torre con acero. El principal problema de la parte de hormigón, es que debe ser montada in situ, por lo que los

costos de montaje se elevan notablemente. Por otra parte, al estar compuestas por hormigón aumenta la rigidez, por lo que se podrán utilizar para torres más altas o ahorro de material.[9]

El tipo de torre que se seleccionó fue la torre tipo tubular de acero tronco-cónica, este modelo está elaborado por secciones, donde a medida que aumenta la altura de la torre contiene menos material y esto ayuda que el peso sea menor. Además, ofrecen una mayor resistencia y necesitan un menor mantenimiento que las torres de celosía. Se optó por este tipo de torre de acuerdo a las condiciones necesarias para su correcta fabricación en la fábrica de Antenas.

1.9 Conclusiones Parciales

Luego de analizar los aspectos tratados en el capítulo se llega a las siguientes conclusiones:

- Con el estudio del mapa potencial eólico en Cuba, se identificaron las zonas donde se encuentra localizado el recurso eólico para su uso con fines energéticos. A partir de esta determinación se propone instalar el aerogenerador de baja potencia en la zona de Gran Piedra, Santiago de Cuba.
- El estudio bibliográfico realizado permitió sintetizar las principales características y clasificación de los aerogeneradores; según sus hélices; según la posición del equipo respecto al viento y de acuerdo a la posición del eje.
- Se constató que las torres de los aerogeneradores se pueden clasificar según sus tipologías en torre celosía, torre de hormigón, torre tubular de acero atirantada y torre tubular de acero.
- A partir del estudio realizado se decide evaluar, según las tipologías de torres existentes, la torre tubular de acero tronco-cónica, teniendo en cuenta el tamaño del aerogenerador, el tamaño del emplazamiento, el impacto visual y que ofrecen una mayor resistencia.

Capítulo 2: Modelado de la Torre.

En este capítulo se realiza el modelado de la torre, obteniendo la completa configuración de la torre, así como el vínculo entre los elementos. Se determinan las cargas actuantes, y la carga de viento extremo que influye sobre la estructura, para realizar una correcta simulación y obtener una buena interpretación de los resultados. Se define el material de la torre, así como el proceso de soldadura a utilizar en dependencia a la factibilidad técnica y económica que permita su producción en la empresa de Antenas.

2.1 Modelado de la torre: Software utilizado

Para la realización de la modelación de la estructura de la torre se utilizó:

Autodesk Inventor: es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D producido por la empresa de software Autodesk. Se basa en técnicas de Software CAD paramétrico, donde se diseñan piezas que se pueden combinar en ensamblajes, para simular o animar en modelos espaciales. Inventor se utiliza en diseño de ingeniería para producir y perfeccionar productos nuevos.

2.2 Geometría y Tipología

La estructura tiene forma tronco-cónica de 14 metros de altura, posee 3 secciones cónicas de 4 metros y una última sección de 2 metros (ver figura 2.3). La sección base (sección 1) está formado por dos partes, una inferior con diámetro de 330 mm que está soldada a una base o brida cuadrada cuyos lados son de 500 mm y posee un agujero en cada esquina con 30 mm de diámetro, consta con 6 cartabones soldados a la base y a la parte inferior, ayudando a la sustentación de la sección; también consta de una caja eléctrica para poner por dentro de la torre el sistema eléctrico (ver figura 2.1). La parte superior de esta sección tiene un diámetro de 190 mm, a esta va soldada una brida circular que posee un diámetro exterior de 330 mm con 6 agujeros de 24 mm de diámetro, y al igual que la parte inferior consta con 6 cartabones soldados a la sección y a la brida (ver figura 2.2). La segunda sección al igual que la sección base está formada por dos partes una inferior y superior. La

inferior con diámetro de 190 mm y una brida de 330 mm de diámetro exterior y la parte superior con un diámetro de 140 y una brida de 280 mm de diámetro exterior. Ambas partes poseen 6 agujeros de 24 mm de diámetro en las bridas y 6 cartabones soldados igual que en la sección 1 (ver figura 2.3). La tercera sección al igual que la sección base está formado por dos partes, una inferior y superior. La inferior con diámetro de 140 mm y una brida de 280 mm de diámetro exterior y la parte superior con un diámetro de 100 y una brida de 240 mm de diámetro exterior, ambas partes poseen 6 agujeros de 24 mm de diámetro en las bridas y 6 cartabones soldados igual que en la sección 1 (ver figura 2.3). La cuarta sección igual que los anteriores está compuesto por dos partes: una inferior y superior. La parte inferior posee un diámetro de 100 mm y una brida de 240 mm de diámetro exterior con 6 agujeros de 24 mm de diámetro y 6 cartabones. La parte superior tiene como diámetro 80 mm y una brida de 142 mm de diámetro exterior, la cual tiene 6 agujeros de 10,5 mm a una distancia entre centros de 48 mm y posee 7 cartabones lo que proporciona una mayor resistencia a esta última parte que es donde va apoyado el aerogenerador (ver figura 2.3). Como aspectos generales que posee la torre es que las secciones y los cartabones tienen un espesor de 5 mm y 8 mm respectivamente, que las bridas tienen un espesor de 16 mm exceptuando la brida base que tiene un espesor de 20 mm y que todos los elementos van soldados menos las uniones de la brida superior con la inferior que se fijan por pasadores (ver figura 2.2).

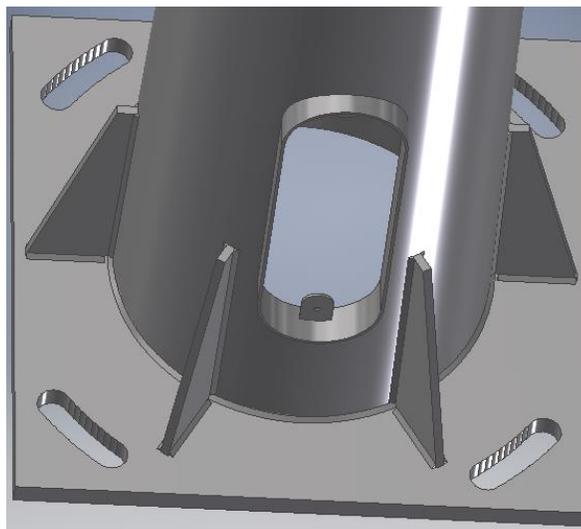


Figura 2.1. Sección 1 base de la estructura.

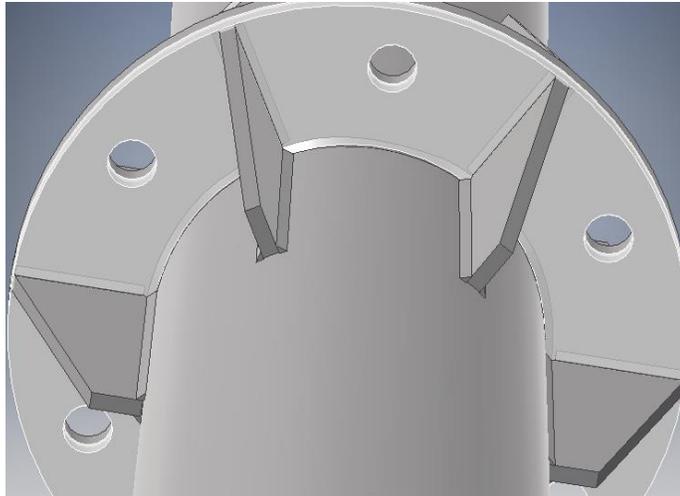


Figura 2.2. Brida superior.

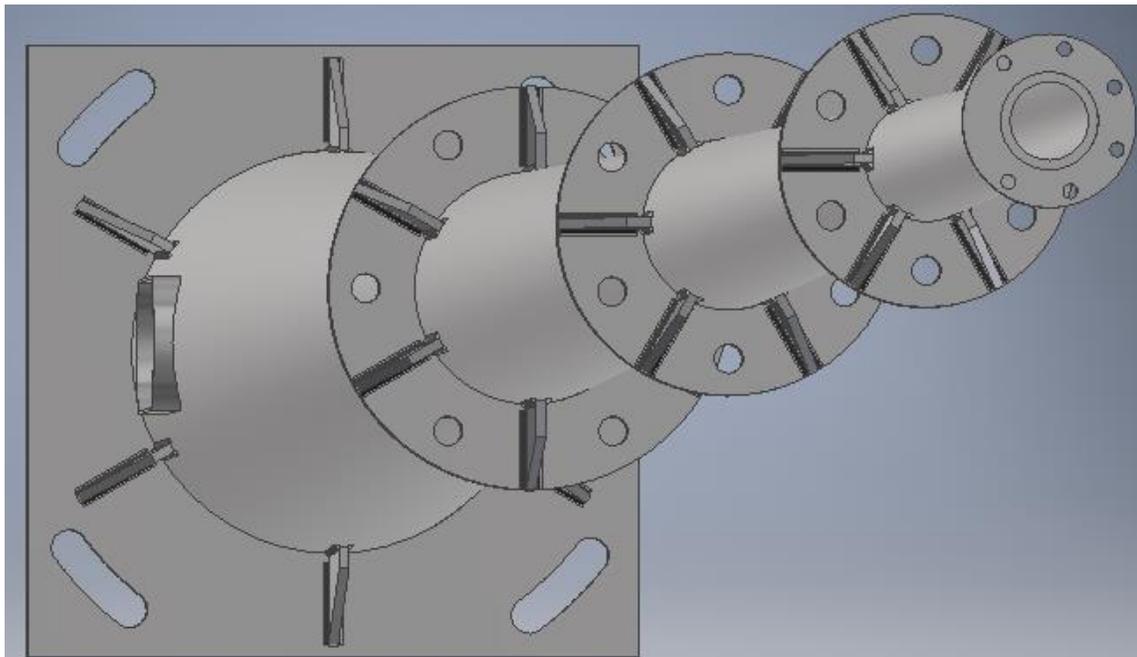


Figura 2.3 Vista superior de la torre.

2.3 Condiciones de apoyo estructura suelo.

2.3.1 Cimentación.

En este trabajo no se analiza las cimentaciones en sí, sino que se asume un empotramiento total y es a partir de esta condición de contorno que se analiza los resultados obtenidos.

Por lo tanto, no se tratará en detalle el diseño de la cimentación del aerogenerador. La función principal de una buena cimentación es garantizar la estabilidad de la estructura y la transmisión de las cargas al terreno.

Comúnmente se utiliza una cimentación de losa cuando el suelo superior es lo suficientemente resistente, cuando este caso no es posible se plantea una cimentación profunda mediante pilotes para encontrar una superficie de terreno de mayor resistencia y calidad.

2.3.2 Unión estructura suelo.

La brida base que se encuentra en la sección 1, se une a la cimentación a través de pernos. Esta variante de fijación nos permite un fácil montaje de la torre y desmontaje en caso de ser necesario.

2.4 Vínculos entre los elementos.

La torre estructuralmente está compuesta por cuatro secciones, cada una de las cuales está formada por un tubo tronco-cónico, dos bridas (una superior y otra inferior); y estos se unen a través de cartabones. Todas estas uniones son logradas mediante soldaduras realizadas a filete (ver figura 2.4). Esta es la razón por lo que el vínculo definido para estos elementos fue empotramiento, debido a que la soldadura restringe todos los grados de libertad de estos.

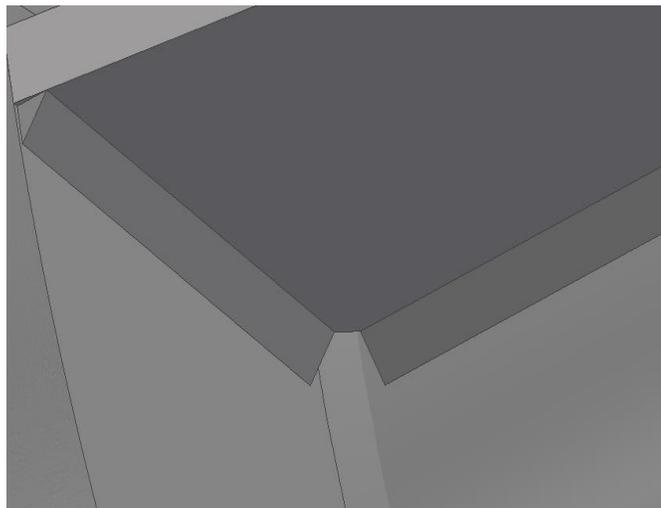


Figura 2.4. Soldadura realizada a filete.

Otra conexión apreciada en la torre es la realizada mediante pernos, localizada en cada una de las uniones de las diferentes secciones de la torre. Esta además de soportar las cargas de la torre, ayuda al fácil ensamble de la estructura (ver figura 2.5).

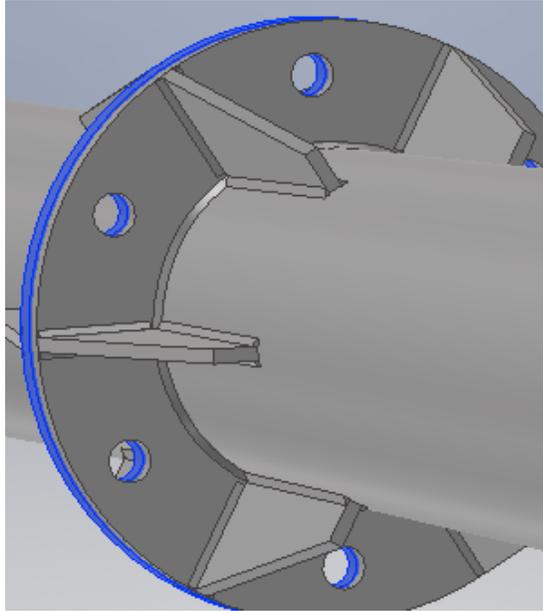


Figura 2.5. Unión de las secciones a través de pernos.

2.5 Determinación de las cargas actuantes sobre la estructura**2.5.1 Carga del peso del aerogenerador**

En la simulación de estructuras es necesario el conocimiento de las cargas horizontales y verticales que estas soportan para la buena interpretación de los resultados. Para la determinación de estas cargas se realizaron entrevistas a los ingenieros de la empresa y se llegó a un consenso de que la carga que va a soportar la estructura es:

- Peso del aerogenerador: 107 Kg

2.5.2 La carga del viento

Según la bibliografía estudiada la energía cinética de una masa de aire que se desplaza viene determinada por la llamada <<Ley del cubo>>. [3]

$$E = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad (1)$$

Siendo:

E = Energía por unidad de tiempo (W).

A = Área interceptada (m²).

ρ = Densidad del aire (kg/m³).

V = Velocidad del viento (m/s).

Pero es la carga del viento en forma de fuerza que ejerce sobre la torre lo que interesa aplicar, en lugar de la energía cinética de éste. Por ello se hará una adaptación de esta <<Ley del cubo>> aplicando a su vez conocimientos de mecánica de fluidos. Considerando el viento como un fluido, se enfocará la búsqueda fuerza ejercida sobre la torre como la resistencia que ofrecen las torres al paso del viento a través de ellas. Y por la ley de la acción y reacción esta resistencia de las torres, será la misma que la fuerza que ejerce el viento sobre ellas.

$$\text{Resistencia aerodinámica} = \frac{1}{2} * C_D * \rho * V^2 * L * D \quad (2)$$

Siendo:

C_D = Coeficiente de resistencia.

ρ = Densidad del fluido, en este caso del aire (kg/m³).

V = Velocidad del viento (m/s).

L = Longitud de la torre (m).

D = Diámetro exterior de la torre (m).

Fr = Resistencia aerodinámica (N).

Para un cilindro sometido a un flujo de aire, este coeficiente de resistencia C_D se puede expresar en función del parámetro L/D del cilindro, tal como se muestra a continuación en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Coeficiente de resistencia C_D que ofrece el cilindro al paso del viento según la relación L/D del cilindro. [10]

L/D	C_D
∞	1.2
40	0.98
20	0.91
10	0.82
5	0.74
3	0.72

Por tanto, habrá que elegir un valor de C_D para efectuar los cálculos de las diferentes torres, de acuerdo con las medidas de las mismas.

Como se quiere demostrar que la estructura soporta las cargas máximas se escoge la mayor velocidad del viento que es 55 m/s.

Como en cualquier gas, la densidad varía con la temperatura y la presión, y ésta, a su vez, con la altura sobre el nivel del mar (ver figura 2.7).

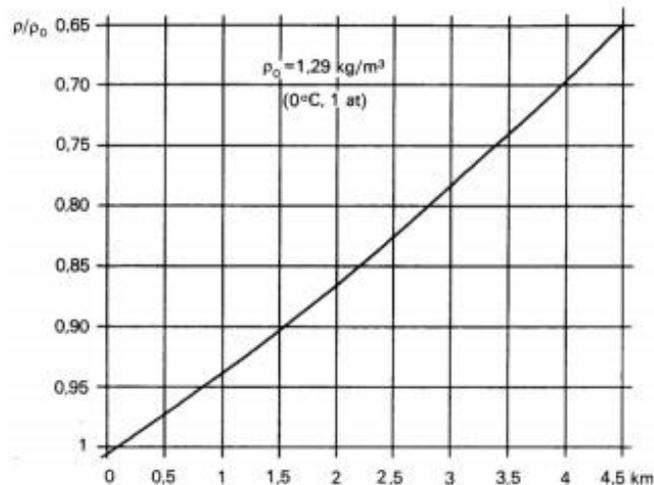


Figura 2.7. Variación de la densidad del aire en función de la altura sobre el nivel del mar. [10]

Finalmente sustituyendo los valores de la ecuación (2) se obtiene:

$$Fr = \frac{1}{2} * 1,2 * 1.27 * (55^2) * 14 * 0.1 = 3227,06 N$$

Donde:

$$CD = 1,2$$

$$\rho = 1.27 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 55 \text{ m/s (velocidad máxima)}$$

$$L = 14 \text{ m}$$

$$D = 0,1 \text{ m}$$

2.5.3 Cargas producidas por el viento sobre el aerogenerador

De la siguiente tabla se tomaron los datos de las presiones en kg que ejerce el viento en función de su velocidad y el modelo del aerogenerador; estos datos se sustrajeron del Manual Bornay P-400 [11].

Aerogenerador V viento (m/s)	3	5	7	11	13	15	55*
Inclin 250	0,683	1,898	3,721	9,188	12,833	17,086	229,711
Inclin 600	1,500	4,167	8,167	20,167	28,167	37,500	504,167
Inclin 1500 neo	3,067	8,520	16,700	41,239	57,598	76,684	1030,970
Inclin 3000 neo	6,000	16,667	32,667	80,667	112,667	150,000	2016,667
Inclin 6000 neo	6,000	16,667	32,667	80,667	112,667	150,000	2016,667

Tabla 2.2 Carga del viento sobre el aerogenerador.

2.6 Material

En cuanto a materiales se refiere, ya se ha visto que en la historia de los aerogeneradores ha destacado el acero y el hormigón como principales componentes de torres. Puesto que el acero tiene un peso mucho menor que el hormigón, característica que interesa, y el material con el que cuenta la Fábrica de Antena es:

Acero: ASTM A 36**Tabla 2.3** Propiedades mecánicas del acero: ASTM A 36 [12]

Resistencia a la tracción:	58,000 - 80,000 psi [400-550 MPa]
Punto mínimo de fluencia:	36,000 psi [250 MPa]
Módulo de elasticidad	200 GPa (29.000 ksi) o (199.948,01 MPa)
Módulo de cizallamiento	79,3 GPa (11.500 ksi) o (79.289,73 MPa)
Elongación en 8":	20% min
Elongación en 2":	23% min

Tabla 2.4 Propiedades Químicas del acero: ASTM A 36[12]

Componentes químicos	Hasta 3/4 in.	Sobre 3/4 in. hasta 1-1/2 in.	Sobre 1-1/2 in. hasta 2-1/2 in.	Sobre 2-1/2 in. hasta 4 in.	Sobre 4 in.
Carbono	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29
Manganeso	--	.80/1.20	.85/1.20	.85/1.20	.85/1.20
Fósforo	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Azufre	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicio	.40 max	.40 max	.15/.40	.15/.40	.15/.40
Cobre min % cuando se especifica de acero de cobre.	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

2.7 Proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW)

El proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding) se aplica para la soldadura de todos los metales y aleaciones de mayor comercialización, lo que incluye los aceros al carbono, aleados e inoxidables, los hierros fundidos, las aleaciones base níquel, aluminio, magnesio, cobre, titanio, zirconio. El proceso de soldadura por arco de metal y gas, el calor del arco generado entre el electrodo consumible y la pieza a ser soldada es utilizado para fundir las superficies del metal base y el extremo del electrodo. El metal fundido del electrodo es transferido hacia la pieza a través del arco, donde se convierte en metal de soldadura depositado (ver figura 2.8). La

protección es obtenida por una cubierta de gas. El gas de protección envuelve el área del arco para protegerlo de contaminantes de la atmósfera.

Los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola soldadora y cables, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia y la fuente de gas protector.

Ventajas del proceso:

- Debido a que es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- Puede soldarse en todas las posiciones, y es posible depositar soldaduras largas sin parar.
- Gran aprovechamiento del metal de aporte (no hay pérdidas por escorias, colillas, etc)

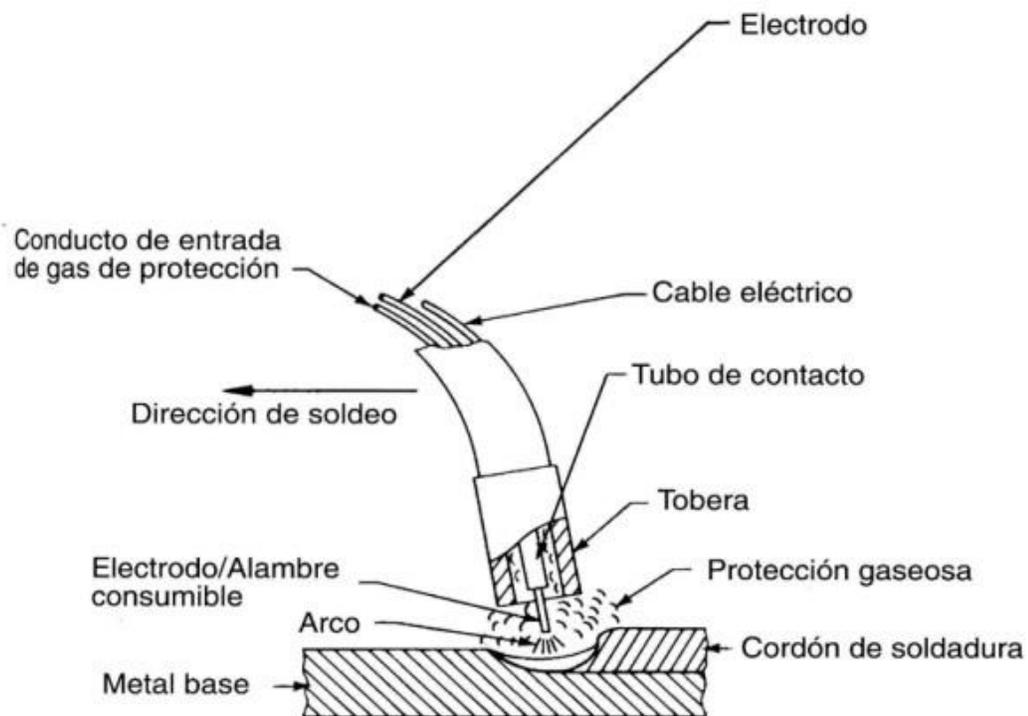


Figura 2.8 Proceso de soldadura GMAW

2.7.1 Electrodo A5.18 según AWS

- **Características sobresalientes.**

Alta productividad, mejor calidad metalúrgica del depósito para su mayor contenido de Manganeso. Atmósfera protectora de mezclas o CO₂.

- **Uso y aplicaciones.**

Proceso MIG/MAG para aceros al carbono. Para uso en máquinas portátiles de potencial constantes como: fabricación de carrocerías, estructuras, pailerías, muebles metálicos y herrería. Construcción en general.[13]

- **Propiedades mecánicas según AWS.**

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas del electrodo A5.18 según AWS.

Gas de protección	CO ₂ o mezclas
Resistencia a la tensión	70 KSI [480 MPa]
Límite elástico	58 KSI [400 MPa]

- **Composición química del electrodo**

Tabla 2.6 Composición química del electrodo A5.18 según AWS.

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0,06-0,15	1,40-1,85	0,80-1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,5

2.8 Estudios a realizar en la torre.

Para obtener una valoración del estudio de la torre y asegurar la estabilidad y resistencia de la misma, se deberán realizar diferentes análisis como:

- **Resistencia máxima**

La máxima resistencia de la torre se determina mediante un cálculo de cargas estáticas debidas al peso de la propia torre y de todos los elementos situados sobre esta (aerogenerador y base del aerogenerador). Se debe de considerar, además, el

momento flector que soporta la base de la torre en consecuencia a las fuerzas aerodinámicas de empuje sobre el rotor.

- **Rigidez**

La estructura de la torre precisa de unos requisitos de rigidez necesaria que evite los desplazamientos que pueden ocasionar las cargas. Esta rigidez es proporcionada por diferentes factores que actúan sobre la estructura, como la característica propia del material, el espesor de los elementos que confiere rigidez y las uniones de los elementos.

- **Resonancia**

Es de gran importancia la realización del estudio de la frecuencia natural de la estructura para evitar que esta coincida con alguna otra frecuencia como la del giro del rotor y entre en resonancia.

2.9 Conclusiones parciales

- A partir del modelado, se determina la configuración de la torre, y el vínculo entre sus elementos, formando una estructura tronco-cónica de 14 metros de altura, con 3 secciones cónicas de 4 metros, y una última sección de 2 metros.
- Se calculó según la bibliografía consultada, el valor de la carga de viento extremo que influye sobre la estructura.
- Se define el material para la fabricación de la torre, de acuerdo a las posibilidades del país.
- Se constató el proceso de soldadura a utilizar, así como la descripción y características del electrodo, en base a la factibilidad técnica que permita su fabricación en la empresa de Antenas.

Capítulo 3: Resultados de la simulación de la torre.

En este capítulo se analizan los resultados de la simulación de la torre obtenidos por medio del software ANSYS Workbench 16.1. Para desarrollar la simulación de la estructura se introducen las cargas actuantes para verificar el comportamiento de la torre bajo condiciones críticas. Además, se realiza una validación de malla con el objetivo de conocer la influencia que pudiera tener el tamaño de la malla en los resultados.

3.1 Software utilizado

Para la simulación de la torre tubular de acero se empleó el software ANSYS Workbench 16.1. Este software es usado en la Ingeniería para la simulación, donde se predice como funciona y reacciona determinado producto bajo un entorno real.

ANSYS es un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA, incluye las fases de preparación de meshing o malleo, ejecución y post proceso. El programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas.[14]

ANSYS Workbench es una plataforma de software donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas. Workbench despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multi-física[14, 15]

3.2 Implementación de las cargas en la estructura.

En la figura 3.4 se aprecian todas las cargas que se introducen en la estructura para realizar la simulación a condiciones extremas. Entre ellas se encuentra la carga del viento sobre el aerogenerador (ver figura 3.1), donde este valor se obtuvo gracias al fabricante. En la (figura 3.2) se aprecia la carga del viento sobre la torre, la cual se calculó anteriormente en el capítulo 2, por la ecuación 2. La carga del peso del aerogenerador es de 1070 N (ver figura 3.3).



Figura 3.1 Carga del viento sobre el aerogenerador.

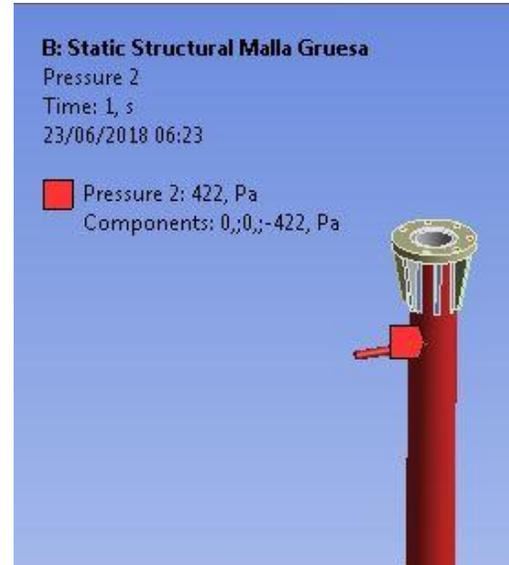


Figura 3.2 Carga del viento sobre la estructura.

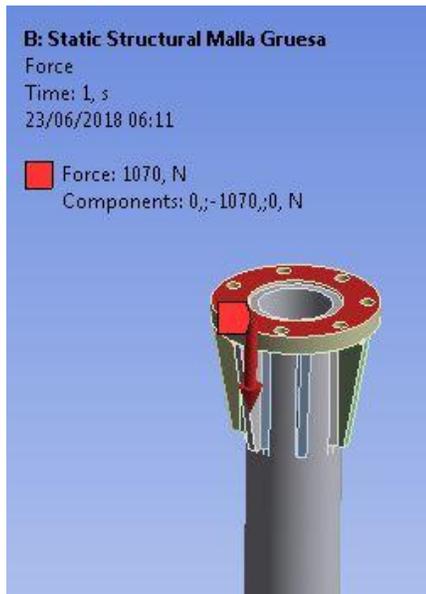


Figura 3.3 Carga del peso del aerogenerador.

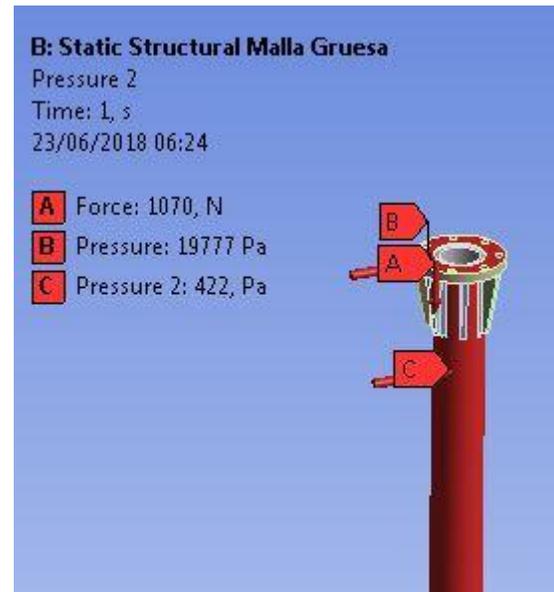


Figura 3.4 Cargas presentes.

3.3 Restricción del modelo

La estructura normalmente es empotrada al suelo con libre movimiento en la punta. En el software se realiza una restricción de movimiento en la parte inferior de la torre (ver figura 3.5).

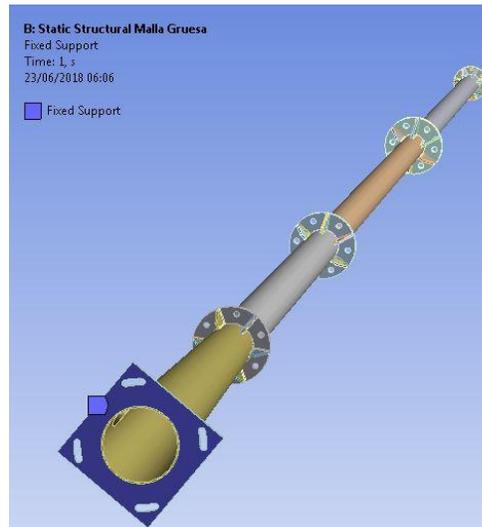


Figura 3.5 Restricción de la torre.

3.4 Mallado de la torre

El software ANSYS Workbench 16.1, para la simulación utiliza diferentes tamaños de malla, malla gruesa, media y fina.

La simulación se realizó en el laboratorio Tarea Triunfo, perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica, haciendo uso de la PC más potente del laboratorio. Para evitar dificultades en la simulación se utilizó en el actual proyecto una simulación por malla gruesa, ya que una simulación con otro tipo de malla, requeriría el uso de grandes recursos informáticos.

La malla gruesa tiene diferentes tamaños según el tipo de elemento, el software por defecto, hace un estudio de geometría y en dependencia de la complejidad de los elementos, se toma el tamaño y la geometría de la malla, esta puede ser cuadrada o triangular y a la vez se puede hacer una malla más fina donde se encuentran los concentradores de tensiones como el caso de las esquinas (ver figura 3.6)

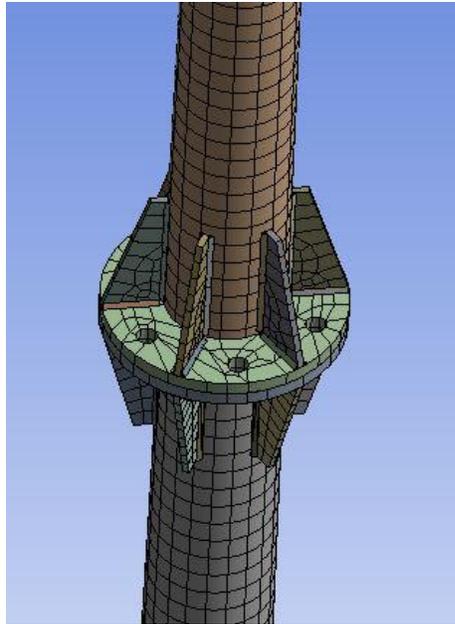


Figura 3.6 Mallado de la torre.

Para asegurar que los datos de la simulación sean factibles se hace necesario realizar una validación de malla. Para ello se ubicaron dos probetas en diferentes lugares geométricos (ver figura 3.7) con la misma variable de tensiones *Von-Mises* para así comparar los valores en cada malla y ver el porcentaje de error

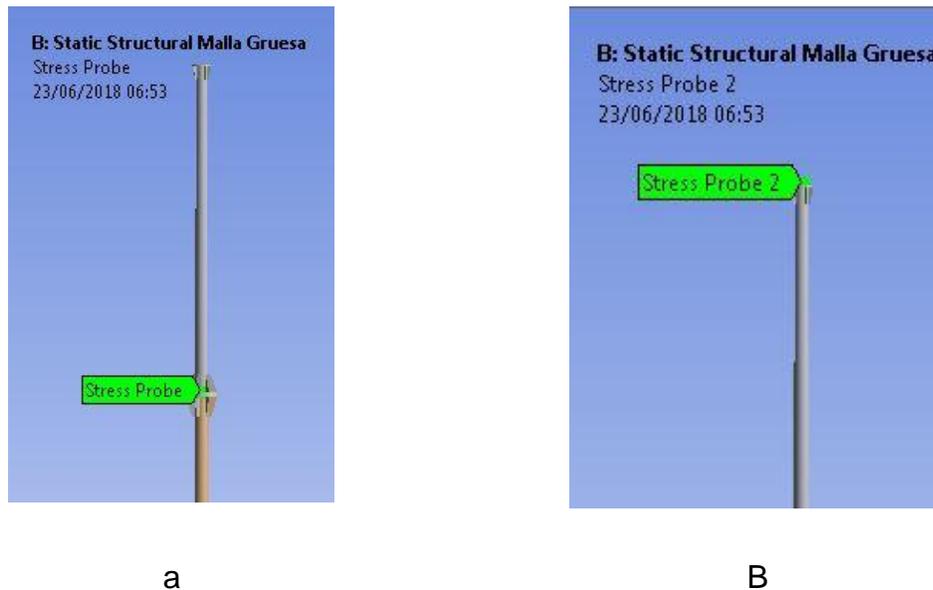


Figura 3.7 Probetas, a) Probeta 1, b) Probeta 2

Este software no permite la visualización de la malla cuando se trabaja en la ventana de los resultados de la simulación, por lo que solo se pueden apreciar los valores obtenidos, como se muestra a continuación en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Validación de Malla.

Tensiones de Von-Mises (MPa)	Malla Gruesa		Malla Media		Malla Fina	
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2
	3,5643	1,0946	3,5709	1,1076	3,5825	1,1098

Las diferentes ubicaciones de las probetas en la torre, muestran la diferencia de los valores de tensiones Von-Mises, producto de que existen más tensiones concentradas en un punto que en otro. Las diferencias entre los valores obtenidos de la validación de malla no sobrepasan un 5% de error entre ellos, por lo que el tamaño de malla no influye en los resultados.

3.5 Análisis de los resultados

- Tensiones de *Von-Mises*

El punto máximo se encuentra en la soldadura de un cartabón con la sección tubular 3 (ver figura 3.8), esto significa que en ese punto se concentran las tensiones más altas de la estructura. La tensión permisible del material de aporte de la soldadura es de 480 MPa. Este valor es mucho mayor que la tensión de Von-Mises obtenida en la simulación (150 MPa); por lo que la torre resiste a las condiciones críticas.

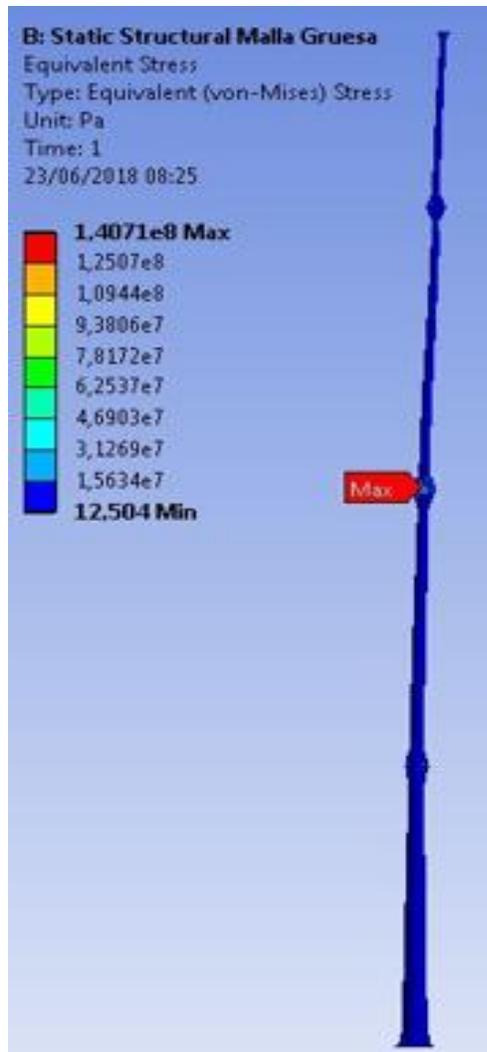


Figura 3.8 Resultados de las tensiones de Von-Mises

- Deformaciones elásticas equivalentes

El valor que presenta la deformación de la estructura es relativamente bajo, siendo este un resultado favorable. Para poder observar esta deformación se acercó la figura a una escala de 44:1 para poder apreciar la deformación que sufre la estructura. La magnitud de desplazamiento es de 0,0007 m aproximadamente 0,7 mm.

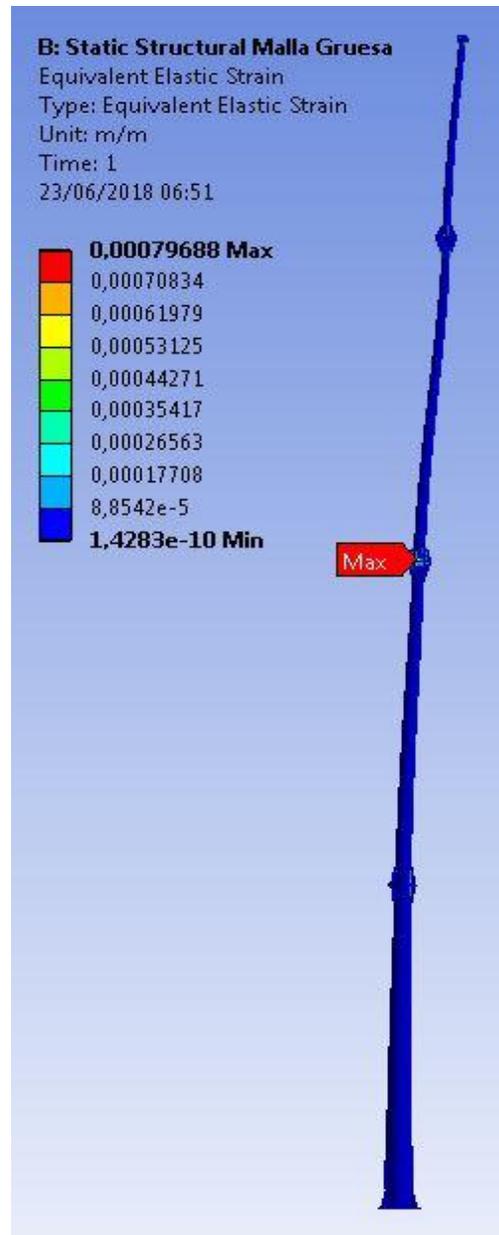


Figura 3.9 Resultados de las deformaciones elásticas equivalentes.

- Desplazamientos resultantes

El desplazamiento máximo se encuentra en la punta de la torre (ver figura 3.10). Este desplazamiento posee un valor de 0,0165 m aproximadamente 17 mm, para poder observar este valor se aproximó este desplazamiento a una escala de 44:1.

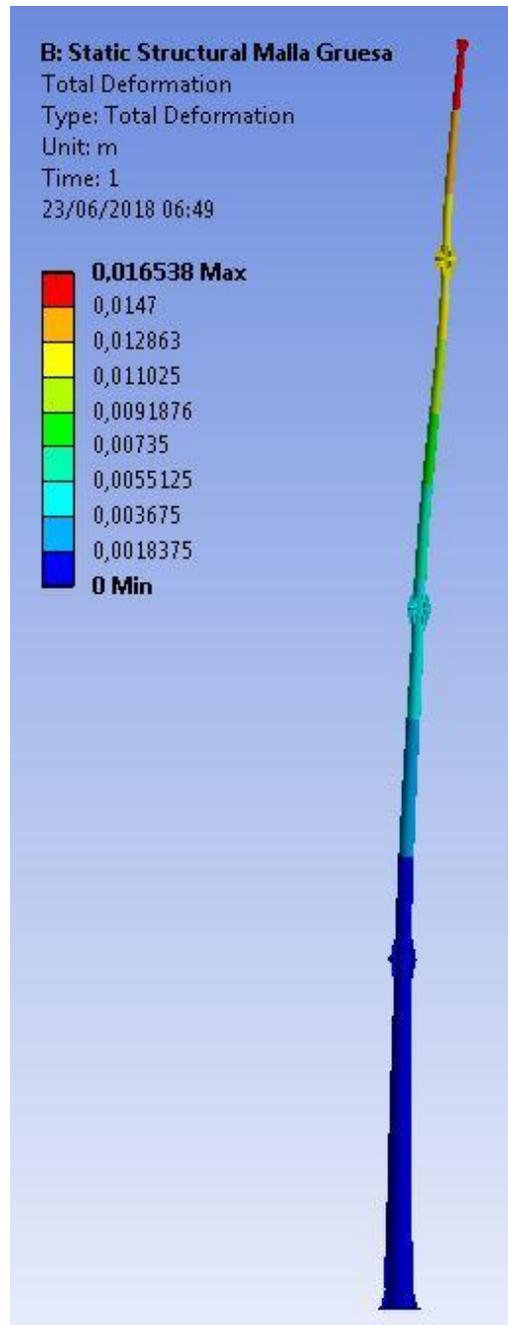


Figura 3.10 Resultado de los desplazamientos

- Factor de seguridad

El coeficiente de seguridad es de 1,77 por lo que la estructura resiste. El valor del coeficiente de seguridad está presente en la zona más alta de concentraciones Von-Mesis. Por lo que esa zona es la más peligrosa de la estructura (ver figura 3.11).

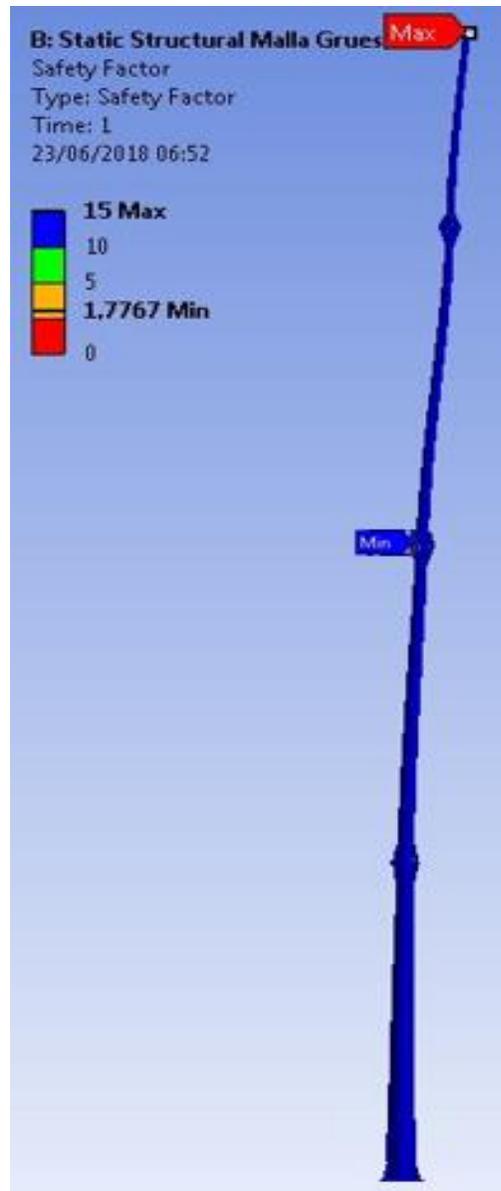


Figura 3.11 Factor de seguridad.

- Análisis modal

El análisis modal es una técnica de análisis dinámico de estructuras. Tiene como objetivo la estimación de propiedades dinámicas como las frecuencias y los modos naturales. Este puede ser teórico o experimental. Para el proyecto se utilizó el análisis teórico el cual se basa en técnicas analíticas

3.6 Conclusiones Parciales

- A partir de la selección del software, se introduce el modelado de la estructura al igual que las cargas sometidas a condiciones críticas, con la finalidad de obtener una correcta simulación.
- Se decide trabajar con una malla gruesa. En la validación se muestra que el tamaño de la malla no es un factor decisivo, producto que las diferencias entre los valores no sobrepasan un 5 % de error.
- La torre resiste a condiciones críticas, mostrando un valor de tensión Von-Mises mucho menor (140 MPa) que la tensión permisible del material de aporte de la soldadura (480 MPa). En cuanto a rigidez y resonancia los valores obtenidos no suelen influir en la falla de la estructura.

Conclusiones Generales

- El estudio bibliográfico permitió identificar la zona más factible para la instalación del aerogenerador de baja potencia en la provincia de Santiago de Cuba, donde existen grandes potenciales para la generación de energía eólica.
- Se evalúa según las tipologías de torres existentes, la torre tubular de acero tronco-cónica que precisa una instalación más complicada y cara, pero ofrece una mayor resistencia y un menor mantenimiento.
- Se calcula la carga del viento extremo que influye sobre la estructura obteniendo una correcta simulación e interpretación de los resultados a partir del modelado.
- De acuerdo a las posibilidades del país se selecciona el material para la fabricación de la torre y el proceso de soldadura a utilizar en base a la posibilidad técnica que permita su fabricación en la empresa de Antenas.
- A partir de la simulación realizada, la torre resiste a resistencia mecánica, y tiene un buen comportamiento en cuanto a rigidez y resonancia.

Recomendaciones

- Cambiar los espesores de las secciones de la torre para una mejor economía a la hora de fabricar la estructura.
- Realizar otra simulación para un mallado fino para obtener resultados con más precisión.

Referencias bibliográficas

1. Pérez, C.A.d.Á., Estudio de un aerogenerador vertical, in Departamen Centro Energético y Estudios Ambietales CEETA2017, Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas.
2. Díez, P.F., Energía eólica in Departamento de Ingeniería Electrica y Energética2000, Universidad de Cantabria.
3. Roman, R.G., Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador, in Departamento de Mécanica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras2005, Universidad Carlos III de Madrid.
4. Generadores eólicos de electricidad.
5. Fleites, W.C., Diseño de un aerogenerador de imanes permanentes, in Facultad de Ingeniería Mecánica2003, Universidad central Marta Abreu de las Villas.
6. Turcan, N., Aerogenerador de viento, in Ingeniería Mecánica2016, Universidad Politecnica de Catalunya Barcelona.
7. Conrado Moreno Figueredo, G.L.V., Leandro Matos Velunza. Estado actual y desarrollo de la energía eólica en Cuba. Available from: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar02/HTML/Articulo01.htm>.
8. Fleites, A.R., Estudio técnico para evaluar la posibilidad de producción de Aerogeneradores de baja potencia en la fábrica de Antenas de Santa Clara., in Carrera de Ingeniería Mecánica2017, Universidad Central«Marta Abreu» de Las Villas.
9. AYALA, I.N., Diseño y cálculo de la torre y la cimentacion de un aerogenerador, 2015, ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL DE BILBAO.
10. M.White, F., Fluid Mechanics.
11. Bornay, Sumate a la experiencia Bornay.

12. K02600, U.
13. Manual electrodes, UTP. 2001.
14. 3D CAD Porta.
15. 3D CAD Portal. Available from: <http://www.3dcadportal.com/ansys.html>.