

*Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas*



**ESTUDIO PARA EL DESARROLLO DE INSTALACIÓN DE AEROGENERADORES
DE ÁLABES TOROIDALES SOBRE EL EDIFICIO TRECE PLANTAS #1 DE LA
CIUDAD DE MATANZAS**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica

Autor: Carlos Alberto Guerrero Hernández

Tutor: Dr. C. Eduardo T. Lincheta Mesa

Matanzas, 2020

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

**“EL QUE NO TENGA EL VALOR DE SACRIFICARSE POR LO
MENOS DEBE TENER EL PUDOR DE CALLARSE ANTE LOS
QUE SE SACRIFICAN”**

José Martí

DEDICATORIA

Este Trabajo de Diploma se lo dedico a mis padres, a mi hermano, a mis abuelos Ángela y Carlos, y a toda mi familia por apoyarme y guiarme en el transcurso de mis años de estudio permitiéndome llegar a donde estoy.

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres, a mi hermano y a mis abuelos Ángela y Carlos, y a toda mi familia por apoyarme en todo momento.
- A mi tutor Eduardo Lincheta por brindarme su ayuda siempre que la necesité.
- A todas las personas que de alguna manera me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

En la actualidad el uso de la energía eólica no solo crece de forma imparable en todo el mundo, sino que además se ha convertido en la mejor demostración de que las energías renovables pueden contribuir a transformar el sistema energético tradicional. Por esta razón se ha considerado como el objetivo de este trabajo el diseño de una instalación de aerogeneradores de álabes toroidales para su aplicación en el edificio 13 plantas #1 de la ciudad de Matanzas. Para esto se hallan los valores de la velocidad y dirección del viento sobre la azotea del edificio en diferentes puntos de medición, con el fin de determinar los lugares de mayor aprovechamiento del flujo de viento donde se instalarán los aerogeneradores. Además, se muestra el cálculo de resistencia de los elementos más cargados de la estructura, la resistencia de los tipos de uniones utilizadas en la instalación y de los álabes toroidales que forman parte del rotor del aerogenerador. También se analizarán los resultados obtenidos y el costo de los materiales necesarios para la construcción de la instalación, así como el aporte que realiza la misma al consumo eléctrico del edificio y el tiempo de recuperación de la inversión a realizar.

Palabras claves: Energía; Aerogeneradores; Álabes; Medición; Flujo; Rotor; Consumo.

ABSTRACT

Nowadays the use of wind energy not only grows unstoppably worldwide, but it has also become the best demonstration that renewable energies can contribute to transform the traditional energy system. This is the reason why it has been considered as the objective of this project the design of a toroidal blade wind turbine installation for its application in the building "13 plantas #1" in the city of Matanzas. For this, the values of the speed and direction of the wind are found on the roof of the building at different measurement points, in order to determine the places of better use of the wind flow where the turbines will be installed. In addition, it is shown the resistance calculation of the most loaded elements of the structure, the resistance of the types of joints used in the installation and of the toroidal blades that are part of the rotor of the wind turbine. The obtained results and the cost of the necessary materials for the construction of the installation will also be analyzed, as well as the contribution it makes to the electrical consumption of the building and the recovery time of the investment to be made.

Key words: Energy; Wind Turbines; Blades; Measurement; Flow; Rotor; Consumption.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 1.1 Energía eólica | 3 |
| 1.2 Aprovechamiento del viento en zonas urbanas..... | 3 |
| 1.3 Medición del viento..... | 4 |
| 1.3.1 Potencia eólica disponible..... | 5 |
| 1.3.2 Cargas de viento..... | 6 |
| 1.3.3 Fuerza del viento..... | 7 |
| 1.4 Tipos de aerogeneradores..... | 8 |
| 1.5 Materiales que se utilizan en la construcción de las palas o álabes de los aerogeneradores | 9 |
| 1.5.1 Plástico reforzado con fibra de vidrio..... | 9 |
| 1.5.2 Polietileno de alta densidad | 10 |
| 1.5.3 Polietileno de baja densidad (LDPE)..... | 11 |
| 1.5.4 Aluminio | 12 |
| 1.6 Ecuaciones a utilizar para el cálculo del conjunto rotor del aerogenerador | 13 |
| 1.6.1 Ecuaciones para el cálculo del peso del rotor | 13 |
| 1.6.2 Ecuaciones para el cálculo de la potencia del rotor | 13 |
| 1.6.3 Ecuación para el cálculo del momento de inercia másico del rotor..... | 15 |
| 1.6.4 Ecuación para el cálculo de la fuerza centrífuga del conjunto rotor..... | 16 |
| 1.7 Estructuras metálicas..... | 16 |
| 1.7.1 Acero empleado en la fabricación de la estructura soporte del aerogenerador | 16 |
| 1.7.2 Ventajas del acero en las estructuras metálicas | 17 |
| 1.7.3 Perfiles de acero para estructuras..... | 17 |
| 1.8 Ecuaciones a utilizar para el cálculo de resistencia de la armadura | 19 |
| 1.8.1 Resistencia a la compresión..... | 19 |
| 1.8.2 Resistencia a cortante..... | 21 |
| 1.9 Tipos de uniones | 23 |
| 1.9.1 Unión por soldadura..... | 23 |
| 1.9.2 Tipo de soldadura..... | 24 |
| 1.9.3 Tipo de electrodo | 24 |
| 1.9.4 Ecuaciones para el cálculo de resistencia de las uniones soldadas | 25 |
| 1.10 Sistema de transmisión y conversión mecánica a eléctrica..... | 26 |
| 1.10.1 Generador de imanes permanentes | 26 |
| 1.10.2 Ventajas de los generadores de imanes permanentes | 27 |
| 1.10.3 Selección del generador de imanes permanentes..... | 27 |
| 1.10.4 Selección del inversor | 28 |
| 1.10.5 Transmisión por correa | 28 |
| 1.10.6 Ecuaciones para el cálculo de la transmisión por correas..... | 29 |
| 1.11 Protección anticorrosiva | 30 |
| Conclusiones del Capítulo 1..... | 31 |
| Capítulo 2 Materiales y Métodos | 33 |

| | |
|---|----|
| 2.1 Caracterización del edificio | 33 |
| 2.2 Consumo eléctrico del edificio..... | 34 |
| 2.2.1 Consumo de los apartamentos | 34 |
| 2.2.2 Consumo de las áreas públicas | 35 |
| 2.2.3 Consumo total del edificio..... | 36 |
| 2.3 Mediciones de velocidad y dirección del flujo de viento sobre el edificio... 37 | |
| 2.3.1 Valores promedio de la componente horizontal de la velocidad del viento en los puntos de medición durante los meses de noviembre a marzo | 40 |
| 2.3.2 Valores promedio de la componente vertical de la velocidad del viento en los puntos de medición durante los meses de noviembre a marzo | 41 |
| 2.3.3 Cálculo de la potencia eólica disponible..... | 42 |
| 2.4 Análisis de la instalación de aerogeneradores a colocar sobre el edificio . 44 | |
| 2.4.1 Estudio de las cargas actuantes sobre la instalación soporte de los aerogeneradores | 47 |
| 2.4.2 Cálculo del momento de inercia másico, masa y peso del conjunto rotor | 49 |
| 2.5 Selección de los perfiles para fabricación de la armadura | 57 |
| 2.5.1 Cálculo de la fuerza del viento que actúa sobre el aerogenerador..... | 57 |
| 2.5.2 Cálculos de resistencia de la armadura | 58 |
| 2.6 Cálculos de comprobación de resistencia..... | 62 |
| 2.6.1 Comprobación de resistencia a la compresión en tubo AD..... | 62 |
| 2.6.2 Comprobación de resistencia a la tracción en el tubo CE..... | 64 |
| 2.6.3 Comprobación de resistencia a cortante de los tornillos en estructura soporte | 64 |
| 2.6.4 Comprobación de resistencia de los álabes..... | 66 |
| 2.6.5 Comprobación de resistencia de las uniones soldadas..... | 71 |
| 2.7 Pedestales y selección del acoplamiento entre rotores | 71 |
| 2.7.1 Selección del acoplamiento entre rotores | 72 |
| 2.8 Cálculo del sistema de transmisión por correas..... | 73 |
| 2.9 Conexión de los aerogeneradores a la red del edificio | 76 |
| 2.10 Método anticorrosivo aplicado a las estructuras | 77 |
| Conclusiones del Capítulo 2..... | 78 |
| Capítulo 3 Análisis de los resultados obtenidos y del costo de la instalación..... | 80 |
| 3.1 Análisis de los parámetros de trabajo y la potencia generada por los módulos de 6 y 12 rotores para velocidades del viento hasta 40 m/s (144 km/h)..... | 80 |
| 3.2 Análisis de resistencia de la armadura y los elementos que conforman el aerogenerador | 81 |
| 3.3 Análisis de los métodos de unión seleccionados..... | 81 |
| 3.4 Análisis del acoplamiento entre rotores..... | 82 |
| 3.5 Análisis del sistema de transmisión por correas | 82 |
| 3.6 Análisis del costo de la instalación | 82 |
| 3.6.1 Costo de un módulo de 6 rotores tipo AEROLIN con álabes toroidales para 3Kw de potencia. | 82 |
| 3.6.2 Costo de un módulo de 12 rotores tipo AEROLIN con álabes toroidales para 5kw de potencia. | 84 |
| 3.6.3 Análisis del costo del método de protección anticorrosiva..... | 85 |
| 3.6.4 Costo total de la instalación | 86 |

| | |
|--|----|
| 3.8 Análisis del aporte de la instalación a la red local del edificio..... | 86 |
| Conclusiones del Capítulo 3..... | 88 |
| CONCLUSIONES..... | 89 |
| RECOMENDACIONES | 90 |
| Referencias Bibliográficas | 91 |
| Anexos | 93 |

INTRODUCCIÓN

La mayoría de sistemas energéticos tradicionales hacen uso de recursos no renovables para la generación de energía, lo que ha causado que el daño al medio ambiente vaya en aumento con el paso de los años. El calentamiento global, la disminución de reservas de petróleo y gas, la incertidumbre en el precio y sostenibilidad en el suministro de combustibles fósiles y su impacto negativo sobre el medio ambiente, están influyendo para que las organizaciones, los gobiernos y las instituciones educativas se interesen cada vez más en encontrar tecnologías para el aprovechamiento de la energía renovable, que sean eficientes, menos contaminantes y que satisfagan diferentes necesidades energéticas.

Actualmente, una de las formas de generación de energía alternativa con mayores perspectivas de uso y difusión es la energía proveniente del viento o energía eólica, que presenta numerosas ventajas con respecto a las formas convencionales de producción de electricidad, debido a la baja incidencia posterior sobre el medio ambiente.

Cuba hace grandes esfuerzos para la introducción de las energías renovables en diversas aplicaciones, entre ellas las dirigidas a la producción de energía eléctrica, como se refleja en las inversiones que actualmente se realizan en la construcción de parques eólicos, parques fotovoltaicos, pequeñas hidroeléctricas. (Hidalgo, 2015)

Durante varios años en la Universidad de Matanzas se han realizado investigaciones con vista a elevar el aprovechamiento de la energía eólica en los edificios altos de la ciudad y en la zona turística de Varadero. Producto de estas se han desarrollado diferentes diseños de aerogeneradores de eje horizontal y vertical, obteniendo como resultado el aerogenerador vertical de álabes toroidales para zonas de viento en turbulencia. (CITMA, 2019)

Entre estos diseños se encuentra el llamado AEROLIN, destinado principalmente para el aprovechamiento del gran potencial eólico que existe en las zonas urbanas que no es aprovechado, como es en las azoteas de edificios altos de la ciudad.

Problema Fundamental:

Como problema principal a solucionar en este trabajo, está el estudio del potencial de viento actuante sobre el edificio objeto de estudio de este trabajo, el diseño de la estructura soporte del aerogenerador, la selección del material, los tipos de uniones; así como las medidas de protección anticorrosiva a utilizar.

Hipótesis Tecnológica:

Con la utilización del acero estructural, en perfiles tubulares, unidos mediante soldadura y protegidos con pinturas anticorrosivas, se logra la fabricación de la estructura soporte del aerogenerador, garantizando su resistencia.

Objetivo fundamental:

Lograr el diseño de la instalación de aerogeneradores de álabes toroidales para su aplicación en el edificio 13 plantas #1 de la ciudad de Matanzas.

Tareas a desarrollar:

1. Realizar el estudio del estado actual de la energía eólica y su aplicación en zonas urbanas.
2. Determinar los puntos de mayor potencial de viento en toda el área libre de la azotea del edificio.
3. Determinar el consumo eléctrico mensual y anual del edificio.
4. Diseño de la estructura soporte de los aerogeneradores de acuerdo con los resultados obtenidos de potencial de viento en los diferentes puntos del edificio y distancia superficial disponible.
5. Realizar los cálculos de resistencia de los elementos que conforman la estructura soporte y al aerogenerador, así como el cálculo de las uniones soldadas y por tornillos.
6. Selección del de protección anticorrosiva y procedimientos de aplicación que contribuyan al alargamiento de la vida útil de la instalación.
7. Realizar el análisis de los resultados y determinar el costo aproximado de la instalación, así como el tiempo de recuperación de la inversión, unido al efecto económico, social y ambiental que aporta.

CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se estudiarán y analizarán las diferentes referencias y recomendaciones científico técnicas, indispensables para el desarrollo del presente trabajo, a partir de lo cual se determinarán, las características y zonas de mayor potencial de viento; de posible aplicación del aerogenerador objeto de estudio, los diferentes materiales a emplear en la instalación soporte, ecuaciones de resistencia, tipos de uniones, perfiles de acero y métodos de protección anticorrosivos; que se proponen utilizar en el diseño y cálculo del aerogenerador. También se caracterizan de forma resumida los distintos tipos de aerogeneradores que existen, y se exponen varios aspectos vinculados a las mediciones del viento, así como el desarrollo internacional de la microeólica.

1.1 Energía eólica

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento. Se trata de un tipo de energía producida por el efecto de las corrientes de aire. Es una energía renovable, limpia, que no se contamina y que ayuda a reemplazar la energía producida a través de los combustibles fósiles.

En la actualidad, esta se utiliza principalmente para producir electricidad, lo que se consigue mediante aerogeneradores conectados a las grandes redes de distribución de energía eléctrica, entre otras. Los parques eólicos construidos en tierra suponen una fuente de energía cada vez más barata y competitiva, e incluso más barata en muchas regiones que otras fuentes de energía convencionales. Además, se puede proporcionar electricidad en regiones aisladas que no tienen acceso a la red eléctrica mediante instalaciones eólicas de reducido tamaño.

1.2 Aprovechamiento del viento en zonas urbanas

Las condiciones para aprovechar la energía del viento en entornos urbanos son más complejas que en zonas abiertas, específicamente atribuido a que la velocidad del viento es más baja y su flujo más turbulento. (García, 2018)

En las zonas urbanas es frecuente el flujo de vientos con turbulencia ocasionada por la presencia de múltiples obstáculos, como casas, edificios, centros comerciales, etc. Ello hace más difícil lograr el aprovechamiento de la energía del viento, debido a una disminución de la eficiencia de los aerogeneradores de eje horizontal y por lo cual para estos casos se han desarrollado diferentes variantes de aerogeneradores de eje vertical. (García, 2018)

1.3 Medición del viento

Para realizar una correcta medición del viento, se debe medir tanto su velocidad como su dirección. Por ello, es necesario un anemómetro y una veleta respectivamente. El anemómetro se utiliza para medir la velocidad del viento, mientras que la veleta nos permite conocer su dirección. Las mediciones deben realizarse con ambos instrumentos, los cuales suelen colocarse próximos y fundamentalmente en los sitios y alturas, donde se proyecta la posible aplicación del aerogenerador. También se deben considerar los mapas eólicos y meteorológicos históricos de las zonas de posible aplicación, además de las normas establecidas internacionalmente y en el país, sobre las características del viento.

En los altos edificios es importante medir las componentes verticales y horizontales del viento en el extremo de la azotea, con el fin de determinar el punto donde se logra un mayor aprovechamiento eólico. Las mediciones de estas componentes, específicamente para el diseño de aerogenerador objeto del presente estudio, se deben realizar a 1m, 1.5m y 2m en la horizontal; mientras que, en la vertical, es decir el flujo de viento ascendente en el lateral del edificio, será a 0.5m, 1m y 1.5m del extremo de la azotea como se muestra a continuación.

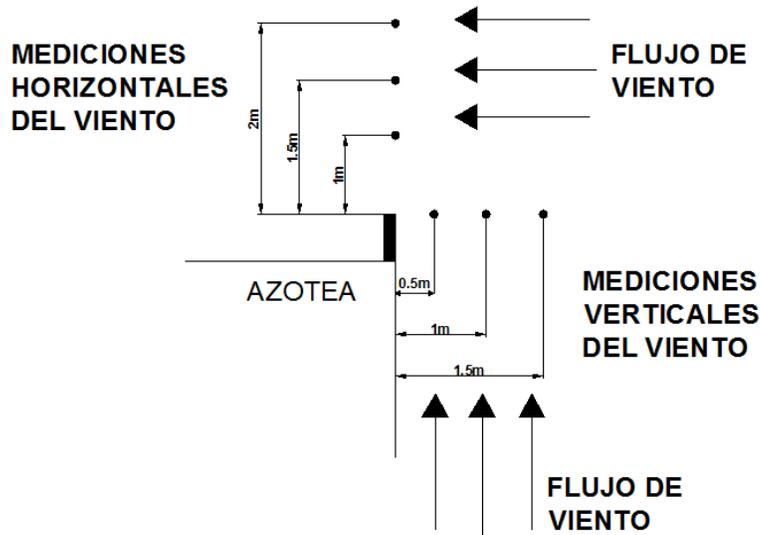


Figura 1.1 Componentes del viento en el lateral del edificio

1.3.1 Potencia eólica disponible

La velocidad del viento es un factor muy importante para determinar cuanta energía puede transformar un equipo en electricidad. Es variable, en función de la hora, del día, de la situación geográfica general y de la topografía local. Por razones técnicas, es imposible extraer toda la energía cinética existente en una corriente de aire. (Morimitsu, 2015)

Para la determinar la potencia eólica disponible es muy importante conocer las características geométricas del aerogenerador, el número de álabes de los rotores que enfrentan al viento; así como el área superficial de contacto. El valor que más se aproxima a la realidad se debe extraer a partir de calcular el valor de la potencia eólica que realmente será aprovechada mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ea} = \left[\frac{1}{2} * \rho * V^3 * (A_p * N_p) \right] * 0.59. \quad (1.1)$$

Donde:

P_{ea} : Potencia eólica que se aprovecha (W).

A_p : Área de la superficie de los álabes que enfrentan al viento (m^2).

N_p : Número de álabes de contacto principal.

V : Velocidad del viento que incide sobre los rotores (m/s).

ρ : Densidad del aire (kg/m^3).

0,59: Factor de Betz (factor de aprovechamiento máximo de la energía eólica del viento, que está definido por la Ley de Betz).

1.3.2 Cargas de viento

En el año 2003 se emite la última actualización que ha tenido la Norma Cubana de viento, con la NC 285:2003, vigente hasta la actualidad. Entre los cuestionamientos que la NC 285:2003 ha tenido, es si los valores de carga unitaria por viento para el cálculo estructural, llega a tener en consideración la ocurrencia de velocidades de viento que abarquen la posibilidad de eventos de las categorías IV y V de la escala Saffir-Simpson, lo que implica valores de velocidades de vientos superiores a los 209 km/h. (Heredia and Burón, 2011)

Según esta norma: Cuando se tengan observaciones directas de las velocidades básicas del viento, se podrán calcular las presiones básicas características del viento (en lo adelante “presión básica”) en una superficie normal a su dirección, mediante la fórmula: (Rodríguez, 2019)

$$q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1.6 * 10^3} \cdot \quad (1.2)$$

Donde:

q_{10} : Presión básica característica del viento correspondiente a velocidades del aire en terrenos llanos y abiertos a una altura de 10 metros sobre el terreno (Pa).

V_{10} : Velocidad característica del viento para un período básico de recurrencia y a una altura de 10 metros sobre el terreno (m/s).

1,6: Factor empírico.

La carga básica (q_{10}) establecida por la norma es de 1.3 kN/m^2 (130 kgf/m^2), para el occidente del país, por la frecuencia y probabilidad del paso de los eventos hidrometeorológicos por su territorio.

Sin embargo, para el aerogenerador vertical de álabes toroidales de este trabajo, diseñado para vientos en turbulencia, la presión básica puede considerarse según los epígrafes 15.2 y 15.3 que se exponen a continuación

- Epígrafe 15.2: La presión básica total de los vientos no extremos será la única carga de viento a utilizar para edificaciones y obras con características bien definidas de provisionalidad.

- Epígrafe 15.3: La presión básica total será constante para cualquier altura, sitio y topografía e igual a 0.50 kN/m^2 (50 kgf/m^2).

1.3.3 Fuerza del viento

Según el Teorema de Bernoulli la presión ejercida por el viento es proporcional a la velocidad del viento al cuadrado:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * V^2 \quad (1.3)$$

Donde:

P : Presión (Pa)

ρ : Densidad (kg/m^3)

V : Velocidad (m/s)

Sin embargo conociendo que $P = \frac{F}{A}$, se calculará la fuerza del viento correspondiente a la velocidad promedio medida en la zona de aplicación mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A \quad (1.4)$$

Donde:

F : Fuerza del viento (N)

A : Área (m^2)

1.4 Tipos de aerogeneradores

Existen dos tipos de aerogeneradores según la disposición de su eje: aerogenerador de eje vertical y aerogenerador de eje horizontal.

Los aerogeneradores de eje horizontal se caracterizan por girar las palas o álabes en dirección perpendicular a la velocidad del viento. Estos se clasifican en aeroturbinas lentas y rápidas, según la velocidad de giro de los rotores. (Structuralia, 2018)

Los grandes aerogeneradores de eje horizontal son los de mayor aplicación internacionalmente, en instalaciones ubicadas en grandes torres fijas y donde la dirección del flujo de viento mantiene una dirección estable en la mayor parte del tiempo, sin embargo en zonas de viento turbulentos como son las zonas urbanas, los aerogeneradores de eje horizontal por lo general, direccionales, es decir que se ajustan a la dirección del viento, pierden eficiencia y por ello, principalmente en estos casos se recomienda el uso de aerogeneradores de eje vertical, los cuales giran siempre en el mismo sentido, independientemente de la dirección del viento. (Mesa et al.)

En los aerogeneradores de eje vertical las palas o álabes rotan en torno al eje central vertical, presentando por tanto tres ventajas fundamentales con respecto a los de eje horizontal: (Structuralia, 2018)

- La sujeción de los álabes es de fácil diseño y ejecución.
- No precisan sistema de orientación para captar la energía del viento.
- Fácil ubicación del tren de potencia, generador y transformador, a nivel de suelo.

Algunos ejemplos de aerogeneradores de eje vertical son:



Figura 1.2 Aerogeneradores de eje vertical

1.5 Materiales que se utilizan en la construcción de las palas o álabes de los aerogeneradores

Para la fabricación de los elementos que conforman el rotor del aerogenerador, es decir, las palas o álabes y el eje central donde se fijan los álabes, se utilizan diferentes materiales entre los que se encuentran: plástico reforzado con fibra de vidrio, mezclas de polietileno de alta y baja densidad, aleaciones metálicas y también la fibra de carbono, de mayor costo que los anteriores.

1.5.1 Plástico reforzado con fibra de vidrio

El plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) es un material compuesto por fibra de vidrio, resina poliéster y catalizador (peróxido de metiletil cetona). Estos materiales son mezclados entre sí para así poder lograr un material sólido con muy buenas características teniendo las ventajas competitivas: (Reyes, 2002)

- Excelente aislante térmico.
- Gran maleabilidad.
- Alta resistencia mecánica.
- Bajo peso, facilitando su instalación.
- Resistencia a la corrosión.

- Menor necesidad de mantenimiento.

La resistencia mecánica de los productos de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) depende de la cantidad de fibra de vidrio que contenga, el tipo de resina y del perfil que tengan. A mayor cantidad de fibra de vidrio, tendremos mayor resistencia mecánica. Las fibras de vidrio son las preferidas como refuerzo estructural debido a la combinación de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y bajo costo con respecto a las demás. (Reyes, 2010)

La resistencia a tracción del material puede oscilar desde los 500 kg/cm² con vidrio proyectado, hasta alcanzar los 10.000 kg/cm² con vidrio unidireccional al 90% en peso.

El resto de propiedades (durabilidad, resistencia a la abrasión, etc.) dependerán fundamentalmente del tipo de resina. Dependiendo de ésta, el material podrá soportar temperaturas entre 125 °C y 300 °C.

1.5.2 Polietileno de alta densidad

El polietileno es químicamente el polímero más simple. Se trata de un plástico barato que puede modelarse a casi cualquier forma, extruirse para hacer fibras o soplarse para formar películas delgadas. (Roca, 2005)

El polietileno de alta densidad es un polímero que se caracteriza por:

- Excelente resistencia térmica y química.
- Muy buena resistencia al impacto.
- Es sólido, incoloro, translúcido, casi opaco.
- Es fácil de procesar, es decir, se puede procesar por los métodos de conformado empleados para los termoplásticos, como inyección y extrusión.
- Es flexible, aun a bajas temperaturas.
- Es tenaz.
- Es más rígido que el polietileno de baja densidad.
- Presenta facilidad para imprimir, pintar o pegar sobre él.
- Es muy ligero.

- No es atacado por los ácidos, se considera una resistencia máxima de 60°C de trabajo para los líquidos, pues a mayor temperatura la vida útil se reduce. Otros termoplásticos ofrecen mejor resistencia a mayores temperaturas.

- Es mucho mejor para el reciclaje mecánico y térmico.

La siguiente tabla muestra algunos de los datos técnicos del polietileno de alta densidad (HDPE).

Tabla 1.1 Ficha técnica del polietileno de alta densidad (HDPE)

| | |
|--|--|
| Densidad (g/mm ³) ISO 1183 | 0.95 |
| Resistencia a la tracción (N/mm ²) DIN en ISO 527 | 28 |
| Resistencia al alargamiento (%) DIN en ISO 527 | +8 |
| Alargamiento de la rotura (%) | 300 |
| Resistencia al impacto (kJ/m ²) DIN en ISO 179 | Sin rotura |
| Dureza superficial (N/mm ²) en ISO 2039-1 | 45 |
| Dureza shore D ISO 868 | 66 |
| Conductividad térmica (W/mK) DIN 52612 | 0.38 |
| Comportamiento ante el fuego | Normal inflamable |
| Rango de temperatura (°C) | -100 hasta +80 |
| Resistencia a los productos químicos | Alta resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes |
| Soldadura | Sí |
| Moldeado en caliente | Posible |

1.5.3 Polietileno de baja densidad (LDPE)

El polietileno de baja densidad es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos, como el polipropileno. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como LDPE (por sus siglas en inglés, Low Density PolyEthylene) o PEBD (polietileno de baja densidad). Como el resto de los termoplásticos, el LDPE puede reciclarse. El polietileno de baja densidad es un polímero

con una estructura de cadenas muy ramificadas; eso hace que tenga una densidad más baja que la del polietileno de alta densidad (HDPE). (Lora et al., 2019)

Características del polietileno de baja densidad:

- Muy bajo coste.
- Buena resistencia térmica y química.
- Muy fácil de producir.
- Buena resistencia al impacto a bajas temperaturas.
- Excelentes propiedades de aislamiento eléctrico.
- Muy baja absorción del agua.
- De color lechoso, puede llegar a ser transparente dependiendo de su espesor.
- Más flexible que el polietileno de alta densidad.

La densidad de este plástico oscila entre 0.910 a $0.925 \frac{gr}{cm^3}$ y es principalmente amorfo, su punto de fusión se encuentra alrededor de los 110°C, tiene un índice de contracción de 1.5 a 3% los productos fabricados a partir de este polietileno mantienen sus propiedades hasta los 60°C, es muy resistente a los ataques de sustancias químicas, es atóxico, impermeable al agua y poco impermeable al vapor de gases. En general, poco más del 70% de éste se emplea en procesos de extrusión de película. (Lora et al., 2019)

1.5.4 Aluminio

El aluminio es el elemento metálico más abundante de la corteza terrestre. Es un metal muy electropositivo y muy reactivo. Al contacto con el aire se cubre rápidamente con una capa dura y transparente de óxido de aluminio que resiste la posterior acción corrosiva. (Castillo, 2016)

A continuación, se muestra una tabla con algunas de las propiedades del aluminio.

Tabla 1.2 Ficha técnica del Aluminio

| Propiedades | Aluminio |
|--------------------------------|----------|
| Densidad (kg/cm ³) | 2.7 |
| Temperatura de fusión (°C) | 660 |

| | |
|---|---------------------|
| Coefficiente de dilatación lineal entre 20 y 100°C | 23x10 ⁻⁶ |
| Calor específico (cal/g°C) a 20°C | 0.28 |
| Conductividad térmica (cal c/c ² seg°C) a 20°C | 0.52 |
| Resistividad eléctrica (Ohm.mm ² /m) a 20°C | 0.03 |
| Módulo de elasticidad (kg/mm ²) | 6.900 |

1.6 Ecuaciones a utilizar para el cálculo del conjunto rotor del aerogenerador

1.6.1 Ecuaciones para el cálculo del peso del rotor

El peso del rotor influye de forma significativa en los cálculos de resistencia de la estructura que lo soporta. Para calcularlo se tuvo en cuenta la siguiente ecuación: (Beer et al., 1967)

$$W = \rho * g * V \quad (1.5)$$

Donde:

ρ : Densidad del material (kg/m³)

W : Peso (N)

g : Aceleración de la gravedad. En este caso $g = 9.81m / s^2$.

V : Volumen (m³)

Además, es común en los trabajos de diseño calcular la masa en kg, para lo cual se emplear la siguiente ecuación:

$$m = \rho * V \quad (1.6)$$

1.6.2 Ecuaciones para el cálculo de la potencia del rotor

La potencia del rotor se determina en función del momento torsor y las revoluciones a las que gira el rotor del aerogenerador mediante la ecuación siguiente: (Beer et al., 1967)

$$N = M_t * \omega . \quad (1.7)$$

Donde:

N : Potencia del rotor.

M_t : Momento torsor.

ω : Revoluciones a las que gira el rotor del aerogenerador.

A su vez el momento torsor se puede calcular de la siguiente manera:

$$M_t = P * R . \quad (1.8)$$

Donde:

P : Fuerza actuante sobre la zona principal del álabe.

R : Radio del conjunto rotor.

Es necesario también saber el valor de la fuerza actuante sobre la zona principal del álabe, la cual se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$P = 0.5 * \rho * V^2 . \quad (1.9)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire.

V : Velocidad del viento.

Las revoluciones a las que gira el conjunto rotor se hallan con la ecuación que relaciona al impulso y cantidad de movimiento como se expresa a continuación:

$$I * \omega_1 + M_t * T = I * \omega_2 . \quad (1.10)$$

Donde:

I : Momento de inercia del rotor.

ω_1 : Revoluciones de entrada.

M_t : Momento de torsor del rotor.

T : Tiempo de estabilidad de marcha.

ω_2 : Revoluciones a la salida.

Como la posición inicial del rotor es en estado de reposo ($I * \omega_1 = 0$), la ecuación anterior se simplifica de la siguiente manera:

$$M_t * T = I * \omega_2 . \quad (1.11)$$

1.6.3 Ecuación para el cálculo del momento de inercia másico del rotor

Para determinar el momento de inercia másico se utiliza la siguiente ecuación: (Hibbeler, 2004b)

$$I_x = K^2 * m . \quad (1.12)$$

Donde:

I : Momento de inercia (kgm^2)

K : Radio de giro (mm)

m : Masa (kg)

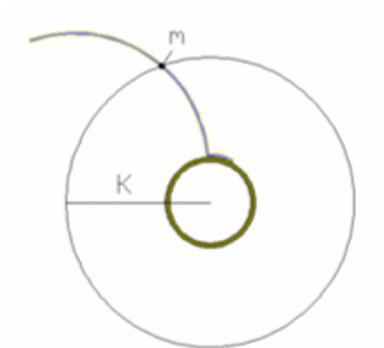


Figura 1.3 Centro de masa y radio de giro.

1.6.4 Ecuación para el cálculo de la fuerza centrífuga del conjunto rotor

El movimiento de giro del rotor con sus álabes provoca una fuerza centrífuga que tiende al desprendimiento del álabe y que es mayor en función de la velocidad de giro, como se puede apreciar en la ecuación siguiente: (Hibbeler, 2004a)

$$F_c = m * \omega * r \quad (1.13)$$

Donde:

m: masa (kg)

ω : velocidad de rotación del rotor (rad/seg)

r: radio (m)

1.7 Estructuras metálicas

Una estructura metálica es cualquier estructura donde la mayoría de las partes que la conforman son materiales metálicos, normalmente acero. Las estructuras metálicas se utilizan por norma general en el sector industrial porque tiene excelentes características para la construcción, son muy funcionales y su coste de producción es más barato que otro tipo de estructuras. (Brotóns, 2010)

La forma más común de estructura metálica es la de tipo armadura. Esta es una estructura reticular de barras rectas interconectadas en nudos formando triángulos planos o pirámides tridimensionales.

1.7.1 Acero empleado en la fabricación de la estructura soporte del aerogenerador

Entre los materiales más utilizados en la actualidad para la fabricación de estructuras están: el acero al carbono, aceros galvanizados, aceros aleados, aceros inoxidables, níquel, aluminio, entre otros.

Para la fabricación de la estructura que soportará el aerogenerador, se utilizará el acero que se produce en la Empresa de Suministros de perfiles de acero conformados en frío

(METUNA), situada en la provincia de Las Tunas, Cuba. En esta se utiliza como acero base para sus perfiles el ASTM A570-85 grado 30 y grado 50.

Este acero tiene valores de límite de fluencia igual a 279MPa y límite de rotura de 338Mp, además al ser de bajo contenido de carbono se puede decir que posee buena soldabilidad. (Rodríguez, 2019)

1.7.2 Ventajas del acero en las estructuras metálicas

Las estructuras metálicas fabricadas de acero cuentan con infinidad de ventajas respecto a otras formas de construcción. A continuación, se mencionan algunas de estas:

- Alta resistencia: la alta resistencia del acero por unidad de peso implica que será poco el peso de las estructuras.
- Uniformidad: las propiedades del acero no cambian apreciablemente con el tiempo como es el caso de las estructuras de hormigón reforzado.
- Durabilidad: si el mantenimiento de las estructuras de acero es adecuado, durarán indefinidamente.
- Ductilidad: La ductilidad es la propiedad que tiene un material de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión. La naturaleza dúctil de los aceros estructurales comunes les permite fluir lo suficiente como para evitar fallas prematuras.
- Tenacidad: los aceros estructurales son tenaces, es decir, poseen resistencia y ductilidad. La propiedad de un material para absorber energía en grandes cantidades se denomina tenacidad.

1.7.3 Perfiles de acero para estructuras

Para la fabricación de estructuras son utilizados distintos tipos de perfiles como los que se muestran a continuación:

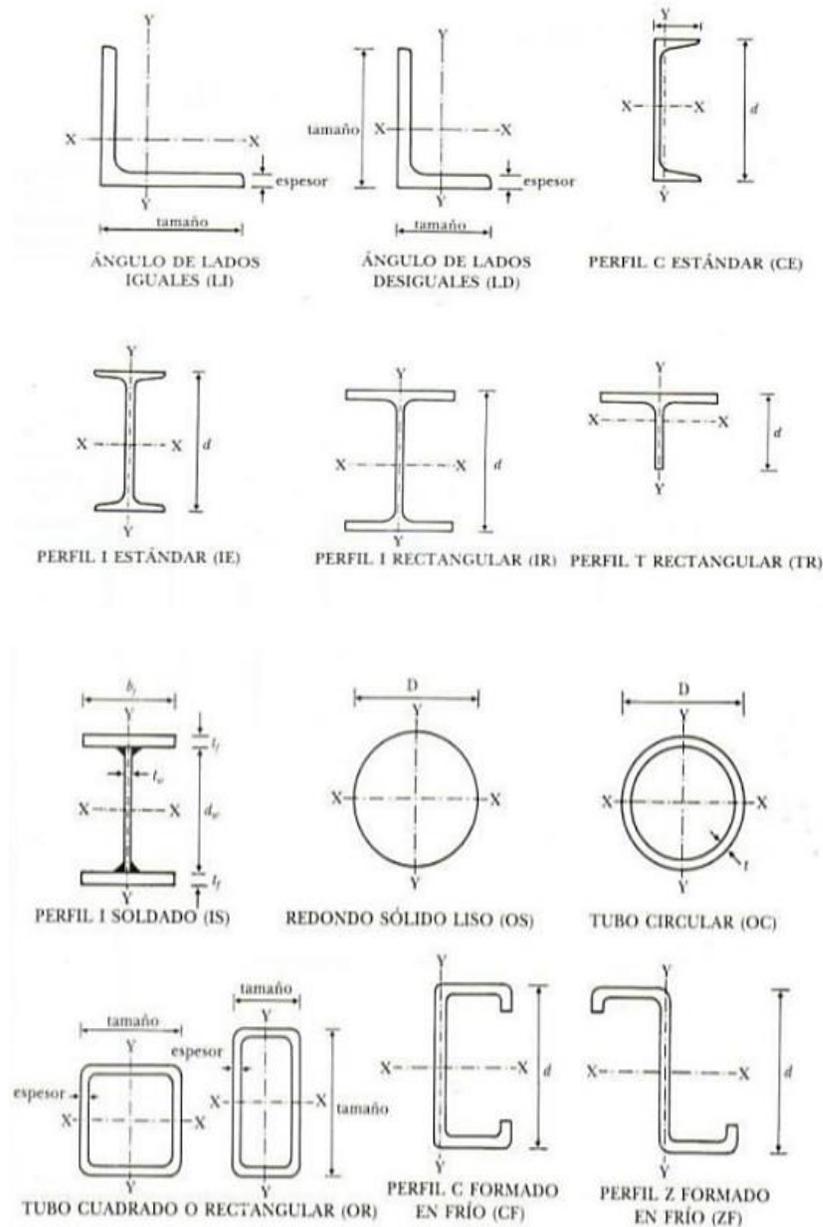


Figura 1.4 Perfiles de acero para armaduras.

Para la construcción de la estructura que soportará el aerogenerador de este trabajo se utilizará el perfil de tubo circular, ya que debido a la geometría de este (no posee bordes), el flujo de viento se desplaza con mayor facilidad como se ejemplifica en la siguiente figura.

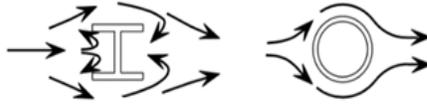


Figura 1.5 Influencia del viento sobre los perfiles.

Además, al poseer esquinas redondeadas presenta mayor resistencia a la corrosión que los perfiles con esquinas agudas.

1.8 Ecuaciones a utilizar para el cálculo de resistencia de la armadura

Para el cálculo de resistencia de la armadura se tienen en cuenta los datos que ofrece el administrador de tubos (METUNA), los cuales se pueden ver en el (Anexo 1).

Primero se necesitan conocer las reacciones de los apoyos de la armadura, para lo cual se utilizarán las ecuaciones de la estática, las cuales se expresan a continuación:

$$+ \rightarrow \sum F_x = 0 \quad (1.14)$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \quad (1.15)$$

$$\curvearrowright \sum M = 0 \quad (1.16)$$

1.8.1 Resistencia a la compresión

Para las barras cargadas axialmente a compresión, la carga crítica de pandeo depende de la esbeltez λ y de la forma de la sección. (Mott and Salas, 1996)

La esbeltez λ depende de la longitud de pandeo L_e y del radio de giro (r).

$$L_e = L * c_1 \quad (1.17)$$

$$\lambda = \frac{L_e}{r} \quad (1.18)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (1.19)$$

Donde:

r : Radio de giro (mm)

I : Momento de inercia (mm⁴)

A : Área de la sección transversal (mm²)

L : Largo de la columna (mm)

c_1 : Depende del tipo de unión en los extremos. Si ambos son articulados $c_1 = 1$; si es uno empotrado y el otro articulado $c_1 = 0.7$; mientras que para ambos extremos empotrados $c_1 = 0.5$.

La esbeltez crítica se determina:

$$c_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 * E}{\sigma_y}} \quad (1.20)$$

Donde:

E : Módulo de Young. Su valor es 204 000 MPa.

σ_y : Límite de fluencia del material (MPa)

Después:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{crit}}{FS} \quad (1.21)$$

$$P_{adm} = \sigma_{adm} * A \quad (1.22)$$

Donde:

P_{adm} : Fuerza admisible (N)

σ_{adm} : Esfuerzo admisible (MPa)

Si se cumple que: $\lambda < c_c$, la columna se considera corta. Entonces se calcula:

$$\sigma_{crit} = \sigma_y \left[1 - \frac{\lambda^2}{2c_c^2} \right] \quad (1.23)$$

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left(\frac{\lambda}{c_c} \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{c_c} \right)^3 \quad (1.24)$$

Si se cumple que: $\lambda > c_c$, la columna se considera larga. Entonces $FS = 1,91$ y se calcula:

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2} \quad (1.25)$$

Donde:

σ_{crit} : Esfuerzo crítico (MPa)

FS : Factor de seguridad.

Por último, debe cumplirse que:

$$P_{adm} > P \quad (1.26)$$

Donde:

P : Fuerza de compresión a que está sometida la columna (N)

1.8.2 Resistencia a cortante

La resistencia a cortante se determina a partir de las siguientes ecuaciones. (Mott and Salas, 1996)

$$\sigma_{adm} \geq \frac{F}{A} \quad (1.27)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad (1.28)$$

Donde:

F : Fuerza a cortante máxima (N)

A : Área de la sección transversal (mm²)

σ_{adm} : Esfuerzo admisible (MPa)

σ_y : Límite de fluencia del material (MPa)

FS : Factor de seguridad.

En caso de ser necesario también se puede aplicar la ecuación a cortante transversal:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} \quad (1.29)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante en el elemento, en el punto situado a una distancia (y') desde el eje neutro. Se supone que este esfuerzo es constante y, por lo tanto, se promedia en toda la anchura del elemento.

V : Fuerza cortante resultante interna, determinada con base en el método de las secciones y las ecuaciones de equilibrio.

I : Momento de inercia de toda la sección transversal calculada respecto al eje neutro.

t : Anchura del área de la sección transversal del elemento, medida en el punto donde se determina τ .

$Q: Q = A * \bar{y}$, donde (A) es la parte superior o inferior del área de la sección transversal del elemento, por encima o debajo del plano de sección donde se mide (t) y (\bar{y}), es la distancia desde el eje neutro hasta el centroide de (A).

1.9 Tipos de uniones

Para unir los distintos elementos que conforman una estructura se utilizan por lo general las uniones por tornillos, por remaches y por soldadura. Donde se debe buscar que el número de uniones sea la menor posible ya que de esta forma se reducen los esfuerzos secundarios. (Rodríguez, 2019)

A la hora de seleccionar qué tipo de unión se va a utilizar, es necesario analizar si existe espacio suficiente para montar las piezas, de manera que permita el acceso de los operarios, vida útil proyectada en la instalación, características funcionales, esfuerzos a la que será sometida, materiales de aplicación y sobre esta base, el costo de la inversión, de manera que sea resistente y rentable en el tiempo de uso.

Atendiendo a las características de la instalación de aerogeneradores que se propone aplicar en el edificio objeto del presente trabajo, se ha determinado el uso de la unión de los diferentes elementos de la instalación tipo armadura, por soldadura y para el sistema de fijación de los álabes al eje rotor, así como para el anclaje de la estructura a la base, la unión por tornillos.

1.9.1 Unión por soldadura

Las uniones soldadas según la posición relativa de las chapas soldadas se pueden clasificar en: (Mancheño and Fernández, 2012)

- Soldaduras en ángulo: en este tipo de configuración no se realiza ningún tipo de preparación en los bordes de las piezas a unir antes de soldar y la penetración del cordón se debe exclusivamente a la fusión que se genera durante el proceso.
- Soldaduras a tope: en este tipo antes de soldar se realiza una preparación de bordes en las piezas, con el objeto de favorecer la penetración del cordón (en las piezas de poco espesor no es necesaria).

A la vez, en las uniones a tope se puede distinguir:

- De penetración completa, cuando la fusión y mezcla entre el material base y el de aportación alcanza a todo el espesor de la unión.
- De penetración parcial, si esta fusión y mezcla no alcanza a todo el espesor.

1.9.2 Tipo de soldadura

Existen varios métodos para unir dos piezas mediante soldadura, sin embargo, en este caso el tipo de soldadura para unir los elementos que conforman la armadura que sostendrá el rotor del aerogenerador se realizará mediante arco eléctrico con varillas de soldar.

La soldadura por arco es el procedimiento más importante y casi exclusivamente utilizado para las estructuras metálicas. Las piezas se unen al provocarse un arco eléctrico entre ellas y un electrodo revestido que constituye el metal de aportación. El electrodo está sujeto a una pinza que sujeta al soldador, es el polo negativo, y el positivo son las piezas que se quieren unir; una buena soldadura depende de los siguientes factores: (Luna, 2009)

- Diámetro del electrodo.
- Distancia del electrodo a las piezas para unir (tamaño del arco).
- Velocidad de avance del electrodo (habilidad del soldador).
- Temperatura en el proceso; de 3000 a 4000 °C.

El gas producido por el revestimiento; protege al material en la parte exterior del cordón queda una capa externa de escoria; el gas hace que la escoria se pueda retirar fácilmente. Se crea un arco eléctrico; que hace que el material vaya saltando y se crea el cordón de soldadura. (Luna, 2009)

1.9.3 Tipo de electrodo

Para la fijación de acero por soldadura se pueden utilizar distintos tipos de electrodos revestidos, atendiendo a la composición del material, a las características mecánicas y

químicas del electrodo, a los esfuerzos a que va a estar sometido y a las posiciones en que se va a soldar. (INDURA, 2005)

En este trabajo se utilizará el electrodo E-6013 que es uno de los más utilizados en Cuba.

Este electrodo se caracteriza por una escoria fácil de remover y un arco suave y estable. En el procedimiento para soldar con este electrodo se pueda utilizar corriente alterna o continua (ambas polaridades). En soldaduras verticales se recomienda utilizar progresión ascendente. (INDURA, 2005)

En la siguiente tabla se muestran algunas de las características del electrodo E-6013.

| Composición química (típica) del metal depositado: | | | | |
|--|---------------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| C 0,11%; Mn 0,40%; Si 0,22%; P 0,015%; S 0,010% | | | | |
| Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04): | | | | |
| Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte | Requerimientos | Energía Absorbida Ch-v | Requerimientos | |
| Resistencia a la tracción : 518 MPa Límite de fluencia : 431 MPa Alargamiento en 50 mm : 28% | 430 MPa 330 MPa 17% | 90J a 20°C | No especificado | |
| Amperajes recomendados: | | | | |
| Diámetro mm | Longitud mm | Amperaje | | Electrodos x kg aprox. |
| | | mín. | máx. | |
| *2,4 | 300 | 40 | 90 | 52 |
| *3,2 | 350 | 70 | 120 | 35 |
| *4,0 | 350 | 120 | 190 | 22 |
| *4,8 | 350 | 160 | 240 | 17 |

Figura 1.6 Características del electrodo E-6013.

1.9.4 Ecuaciones para el cálculo de resistencia de las uniones soldadas

Es común en el cálculo de resistencia de las uniones soldadas despreciar el esfuerzo normal y basar el tamaño de la junta, en la intensidad del esfuerzo cortante medio. El área de la garganta de la soldadura a 45° de los catetos es la mínima área del cordón por donde tiene que fallar a corte para que no resista la unión soldada. (Ringegni, 2013)

En el diseño de la soldadura se acostumbra a basar el esfuerzo cortante en el área de la garganta y desprender totalmente el esfuerzo normal, en consecuencia, la ecuación del esfuerzo medio es:

$$\tau = \frac{P}{h * L * N} \quad (1.30)$$

Donde:

P : Mayor fuerza existente en la estructura (N)

L : Largo del cordón de soldadura (mm)

N : Número de cordones

$$h = 0.707 * h_c \quad (1.31)$$

h_c : Garganta (mm)

1.10 Sistema de transmisión y conversión mecánica a eléctrica

Está previsto que el aerogenerador se desarrolle en módulos de 6 y 12 rotores, los cuales a partir del momento generado por el flujo de viento actuante sobre los álabes, provoquen el giro del rotor y con ello la energía suficiente para el funcionamiento del generador eléctrico, mediante una transmisión de poleas y correas, acopladas al mismo, que se ajustará a la velocidad de giro o RPM y torque requerido, para una potencia eléctrica, por módulo de 6 rotores aproximada a 3 kW, a partir de lo cual, se analizarán las recomendaciones y ofertas de generadores eléctricos y demás componentes, para la conexión del aerogenerador a la red eléctrica del edificio.

1.10.1 Generador de imanes permanentes

Para convertir la energía mecánica proporcionada por el aerogenerador en energía eléctrica se utilizará un generador de imanes permanentes.

Un generador de imanes permanentes es un generador síncrono en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante.

1.10.2 Ventajas de los generadores de imanes permanentes

La principal ventaja es su simplicidad. La fabricación y montaje del rotor es más barata si se usan imanes. No necesitan mantenimiento ya que no llevan escobillas. Además, la consistencia mecánica de un generador de imanes permanentes es muy superior, aparte de no necesitar sistemas para su excitación. Al eliminar la excitación se puede llegar a ahorrar un 20% de energía simplemente por usar imanes. Al ser una fuente de energía independiente del generador, puede servir para suministrar energía a sistemas auxiliares del generador principal.

1.10.3 Selección del generador de imanes permanentes

El generador de imanes que se utilizará es de la marca Naier de origen chino.



Figura 1.7 Generador de imanes permanentes marca Naier.

Datos del generador:

- Precio: US \$700,00-1500,00/ Pieza.
- Cantidad mínima: 1 Pieza.
- No. de Modelo: NE-3KPG y NE-5KGP.
- Tipo de salida: CA trifásica.
- Certificación: CE, ISO, RoHS.
- Marca: Naier.

- Estándar: 3000W-5000W 96V/120V/220V.
- Origen: China, Jiangsu.
- Velocidad de rotación: 300 RPM

1.10.4 Selección del inversor

Un inversor es un dispositivo que cambia o transforma una tensión de entrada de corriente continua a una tensión simétrica de salida de corriente alterna, con magnitud y frecuencia deseada por el usuario.

El inversor que se utilizará es el Ingecon® Wind con transformador 3.3 y 5.



Figura 1.8 Inversor Ingecon® Wind.

Esta familia de inversores adecúa la energía producida por un aerogenerador inyectándola a la red eléctrica cumpliendo la normativa vigente. La nueva gama de inversores Ingecon® Wind con transformador puede adaptarse a una amplia gama de aerogeneradores para pequeñas instalaciones mini-eólicas de entre 2.500 W y 5.000 W.

Algunas características de este inversor se pueden ver en el (Anexo 2).

1.10.5 Transmisión por correa

La conexión entre el rotor del aerogenerador y el generador eléctrico de imanes permanentes se utilizará una transmisión por correa. Este tipo de transmisión se utiliza generalmente para altas velocidades de rotación, y además cuando las potencias están dentro del intervalo de 0,3 kW a 50 kW. Este tipo de transmisión es empleada con frecuencia en máquinas de herramientas, instalaciones industriales, entre otras aplicaciones. También se puede utilizar en aerogeneradores de eje vertical como el del

presente trabajo con el objetivo de vincular la velocidad de rotación y el momento torsor del rotor del aerogenerador y el generador de imanes permanentes.

1.10.6 Ecuaciones para el cálculo de la transmisión por correas

Es necesario conocer en una transmisión por correas la relación de transmisión que existe entre la polea conductora y la polea conducida, así como sus respectivos diámetros primitivos, para lo cual se utilizará la siguiente ecuación: (USECHE, 2009)

$$u = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (1.32)$$

Donde:

u : Relación de transmisión.

D_1 : Diámetro primitivo de la polea conductora (mm)

D_2 : Diámetro primitivo de la polea conducida (mm)

n_1 : Revoluciones por minutos en la polea conductora

n_2 : Revoluciones por minutos en la polea conducida

ω_1 : Velocidad de rotación de la polea conductora (rad/seg)

ω_2 : Velocidad de rotación de la polea conducida (rad/seg)

Una vez conocidos estos valores es necesario conocer el momento torsor existente en cada una de las poleas, para lo cual se utilizarán las ecuaciones del epígrafe 1.6.

La selección del tipo de correa que se utilizará en la transmisión, así como su perfil se realizó a partir de las recomendaciones que se hacen en el Catálogo de Correas Industriales de la marca Dumlop, donde entre todas las existentes se seleccionó la correa trapezoidal (perfil B), ya que poseen larga vida de servicio, pueden operar a temperaturas

de 35°C a 70°C sin ninguna dificultad, tienen alta flexibilidad y resistencia al desgaste, y además se caracterizan por amortiguar las vibraciones en la transmisión y ser silenciosas.

Para el cálculo de la longitud de la correa se empleará la siguiente ecuación:

$$L_{correa} = 2 * A_{tent} + \frac{\pi}{2} (D_2 + D_1) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4 * A_{tent}} \quad (1.33)$$

Donde:

A_{tent} : Distancia entre centros tentativa. Este es un valor para fijar el valor final de la misma (mm)

D_1 : Diámetro de la polea conductora (mm)

D_2 : Diámetro de la polea conducida (mm)

Luego se normalizará la longitud de la correa (L_n) seleccionando el valor más cercano al resultado calculado utilizando el catálogo.

Se calcula la distancia entre centros de montaje real, mediante la siguiente ecuación:

$$A_{wreal} = A_{tent} \mp \frac{\Delta L}{2} = A_{tent} \mp \frac{L_n - L_{correa}}{2} \quad (1.34)$$

En caso de que L_n sea mayor que L_{correa} se utiliza el signo (+), cuando L_n sea menor que L_{correa} se utiliza el signo (-).

1.11 Protección anticorrosiva

Cuba posee condiciones de alta, muy alta y extrema agresividad corrosiva, por lo que la protección anticorrosiva fundamentalmente en las estructuras metálicas juega un papel muy importante para lograr su conservación y alargar su vida útil. Para justificar la atención que este fenómeno se puede señalar que las pérdidas por corrosión en Cuba son

del orden del 4% del producto interno bruto y corresponde a la corrosión atmosférica el 50% de ellas. (Corvo et al., 2008)

La protección por recubrimiento (pinturas) constituye el método más empleado de combate anticorrosivo, esto se debe gracias a su efectividad, fácil acceso, universalidad y facilidad de aplicación. El principio esencial de este método es aislar o separar al metal del medio corrosivo (método pasivo de protección).

Dentro de lo que se denomina pintura, se encuentran los barnices, los esmaltes, las lacas y las pinturas, aunque debe señalarse que estos nombres son cada vez menos concretos a medida que los componentes de las formulaciones modernas han aumentado en diversidad y complejidad. Las pinturas son sustancias aparentemente homogéneas que pueden aplicarse en forma de capa delgada sobre cualquier superficie y que por procesos químico-físicos se solidifican produciendo capas adherentes y poco porosas, aislando el material del medio exterior y cumple diversas funciones tales como: protección anticorrosiva, color a gusto, brillo, etcétera.

Pueden emplearse los siguientes tipos de pinturas: pinturas de secado al aire; pinturas de curado físico (en base disolvente o en base agua); pinturas de curado químico (epoxídicas, de poliuretano, por humedad). (Corvo et al., 2008)

Conclusiones del Capítulo 1

- Se decidió medir la velocidad del viento a distancias de 0.5 m, 1 m y 2 m sobre el plano horizontal de la azotea, y a 0.5 m, 1 m y 1.5 m del plano vertical (superficie lateral) del edificio.
- Se determinó utilizar el acero ASTM A570-85 grado 30 en la estructura soporte del aerogenerador.
- Se empleará el perfil de tubo redondo en la construcción de la armadura.
- Se establecieron todas las ecuaciones a utilizar.
- Para la transformación de la energía eólica en eléctrica se puede utilizar el generador eléctrico de imanes permanentes marca Naier de origen chino.

- Para la conexión de los aerogeneradores a la red del edificio se utilizará el inversor Ingecon® Wind con transformador 3.3 y 5.

Capítulo 2 Materiales y Métodos

En el presente capítulo se hará una caracterización del edificio objeto de estudio, se expondrán los valores de velocidad del viento, así como la metodología empleada para llevar a cabo las mediciones de estos. También se realizarán los cálculos de resistencia correspondientes a la armadura que sostendrá el aerogenerador. Además, se comprobará la resistencia del tipo de soldadura a utilizar. Por último, se indicará la pintura anticorrosiva que se aplicará en la armadura.

2.1 Caracterización del edificio

El objeto de estudio de este trabajo es el edificio 13 plantas #1 ubicado en la calle 129 (calzada), entre 204 y 206, reparto Peñas Altas, ciudad de Matanzas. Este cuenta con un total de 166 apartamentos, dos elevadores y posee una bomba de agua que abastece todos los apartamentos.



Figura 2.1 Edificio objeto de estudio

Debido a que está ubicado en una zona cercana a la costa norte de Matanzas, es afectado en gran medida por los vientos provenientes de esa dirección, que junto a la altura del edificio hacen que su azotea sea un buen lugar para el aprovechamiento de la energía eólica.

2.2 Consumo eléctrico del edificio

Para conocer el consumo eléctrico del edificio se realizó un estudio, donde se recopilaron los valores de consumo eléctrico de los 166 apartamentos, el elevador, la bomba de agua y el alumbrado público durante todo el año.

2.2.1 Consumo de los apartamentos

Mediante la recopilación de comprobantes del pago de la electricidad de varios hogares se pudo conocer el consumo aproximado durante todo el año de los 166 apartamentos existentes. También se realizaron encuestas al encargado y a las personas que residen en el edificio para ratificar dichos valores. Mediante la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

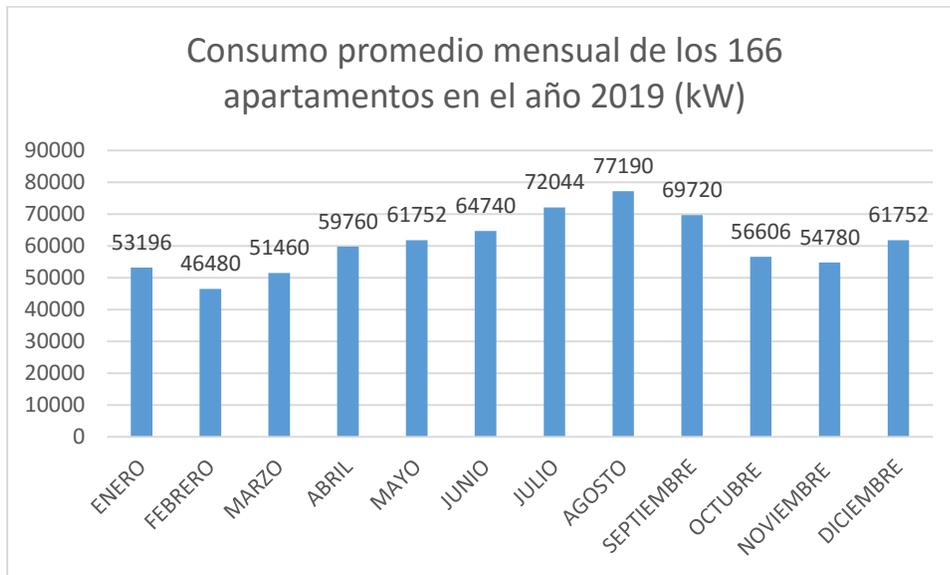


Figura 2.2 Consumo promedio anual de los 166 apartamentos

Como se puede observar los meses donde existe mayor consumo eléctrico son julio y agosto, ya que estos corresponden al período de vacaciones y es cuando mayor tiempo pasan los residentes en sus hogares.

El consumo anual del total de apartamentos se determina mediante la suma de todos los valores que en la anterior tabla se ofrecen, por lo que se puede decir que al año se tiene un consumo de 729 480 kW.

2.2.2 Consumo de las áreas públicas

Para determinar el consumo de las áreas públicas se recopilaron los valores de consumo eléctrico del elevador, la bomba de agua y del alumbrado público en cada mes del año.

El elevador posee una potencia eléctrica de funcionamiento de 7.5kW como se puede observar en el (Anexo 1):



Figura 2.3 Motor del elevador

Se comprobó con el encargado del edificio, que el tiempo promedio de funcionamiento diario es 12 horas. Multiplicando el tiempo promedio de funcionamiento por la potencia eléctrica del elevador se obtiene el consumo en las horas promedio de funcionamiento dando como resultado 90 kWh al día. El consumo del alumbrado público es de 8 kW por día, mientras que la bomba de agua trabaja dos veces al día por un total de 4 horas diarias, esta consume 3 kW diariamente.

Conociendo todos estos valores y colocándolos en una tabla en EXCEL se obtuvieron los siguientes resultados:

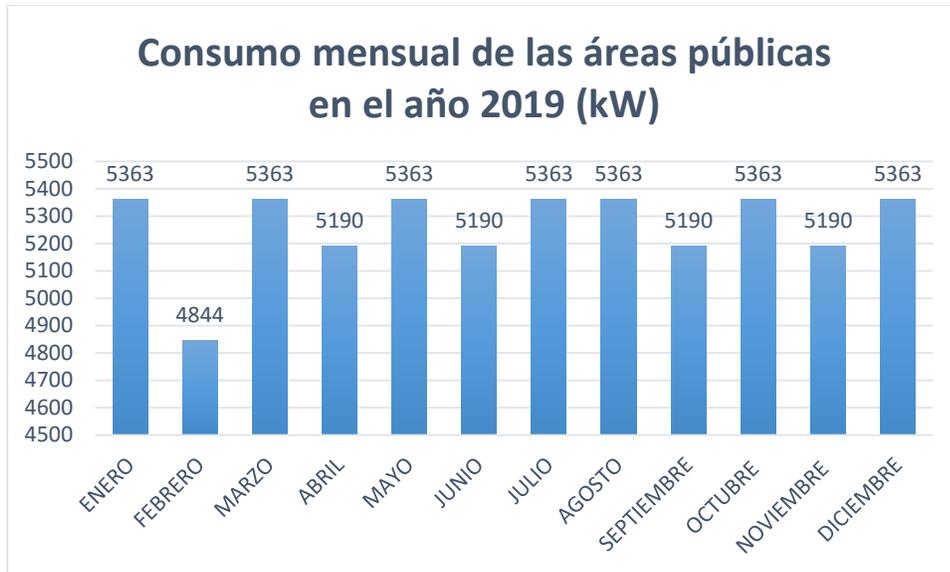


Figura 2.4 Consumo mensual de las áreas públicas

Como se observa en la tabla el consumo de las áreas públicas es mayor en los meses que tienen 31 días (enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre), mientras que el mes de menor consumo es febrero ya que este tiene 28 días.

El consumo anual de las áreas públicas se determina mediante la suma de todos los valores que en la anterior tabla se ofrecen, por lo que se puede decir que al año se tiene un consumo de 95 995 kW.

2.2.3 Consumo total del edificio

Conociendo el consumo de los apartamentos y de las áreas públicas se pudo determinar el consumo mensual del edificio, valores que a continuación se muestran:

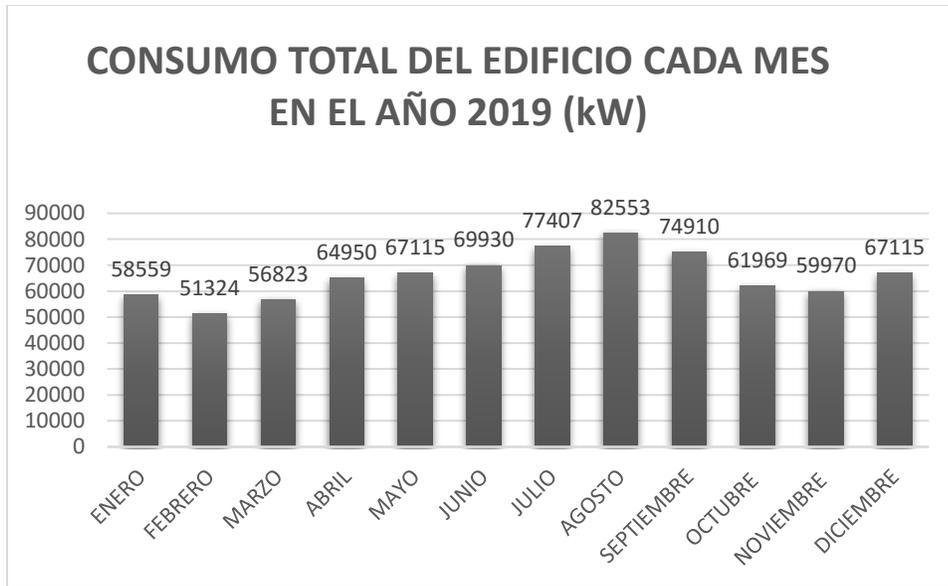


Figura 2.5 Consumo del edificio en el año 2019

El mes de mayor consumo en el año es agosto con 85 343 kW y el de menor consumo es febrero con 53 844 kW.

El consumo anual del edificio se determina mediante la suma de todos los valores que en la anterior tabla se ofrecen, por lo que se puede decir que al año se tiene un consumo de 825 475 kW.

2.3 Mediciones de velocidad y dirección del flujo de viento sobre el edificio

Las mediciones del viento sobre la azotea del edificio se llevaron a cabo en los laterales que se encuentran orientados hacia el norte y el este, ya que esta es la zona donde más incide el viento a lo largo del año.

Para esto se dividió la azotea en 11 puntos de medición como se muestra a continuación:



Figura 2.6 Puntos de medición en la azotea. Fuente: Google Earth 2019

Para llevar a cabo las mediciones se utilizó el anemómetro digital AIRFLOW modelo LCA6000, el cual muestra la velocidad del viento en m/s y el anemómetro analógico Schiltknecht modelo CH-8625 Gossau, con su escala de medición en Km/h. Además, para conocer la dirección del viento se empleó una veleta y una brújula.



AIRFLOW LCA6000 Schiltknecht CH-8625 Gossau

Figura 2.7 Instrumentos para la medición de la velocidad del viento



Figura 2.8 Instrumentos para medir la dirección del viento

Se midieron las componentes vertical y horizontal del viento en cada uno de los puntos señalados. Las mediciones se realizaron semanalmente durante los meses de noviembre hasta mayo, en el horario entre las 2 y 5 de la tarde.



Figura 2.9 Mediciones realizadas en la azotea del edificio

La dirección del viento predominante a lo largo de los meses de estudio fue el noreste. Esto trae consigo que el punto donde existe mayor velocidad del viento es el punto 3.

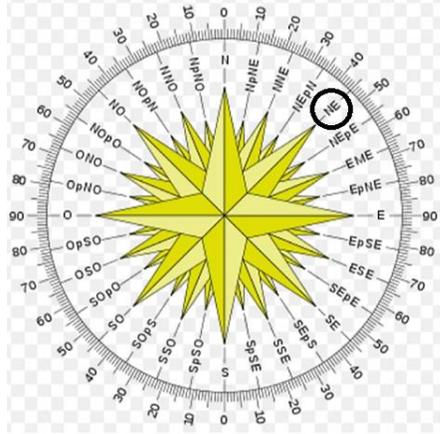


Figura 2.10 Dirección predominante del viento en los meses de estudio

2.3.1 Valores promedio de la componente horizontal de la velocidad del viento en los puntos de medición durante los meses de noviembre a marzo

A partir de las mediciones realizadas en los meses de noviembre a marzo se confeccionó el siguiente gráfico que muestra los valores promedio de la componente horizontal de la velocidad del viento en cada uno de los puntos de medición.

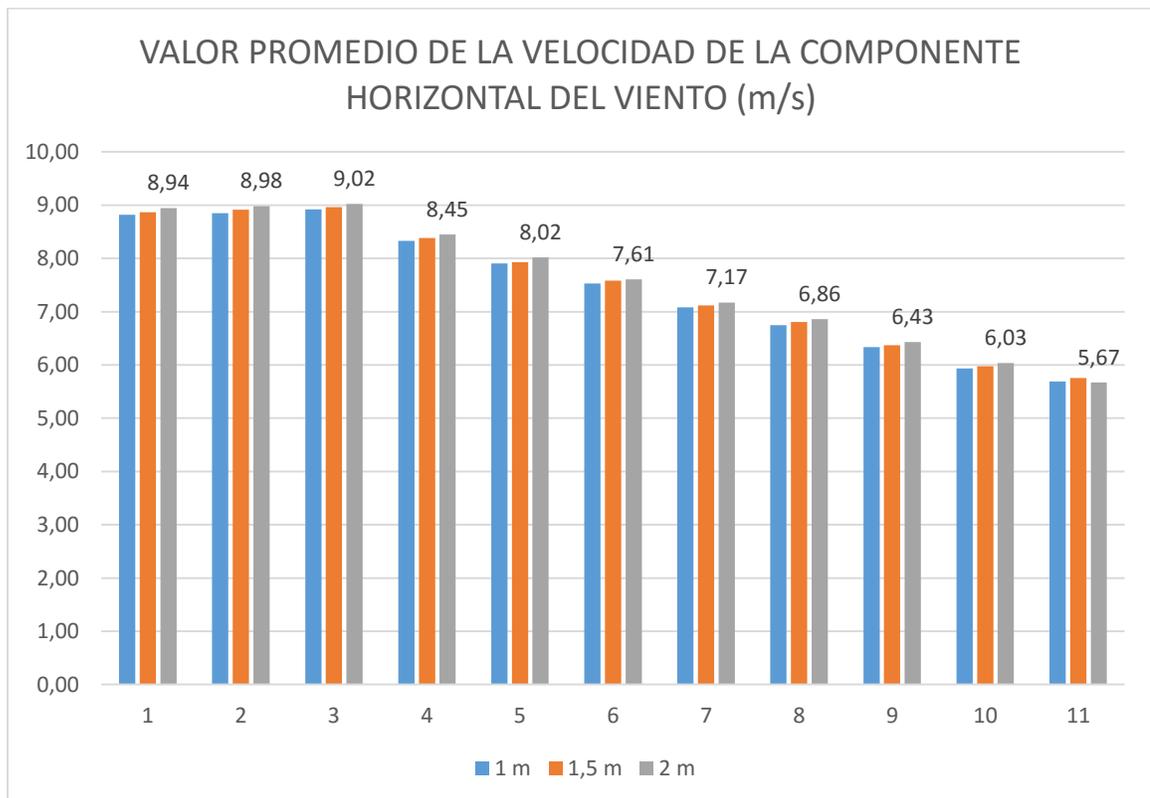


Figura 2.11 Valores promedio de la componente horizontal del viento en los puntos de medición

Como se puede observar los mayores valores de la velocidad del viento se obtienen a 1 m, y el punto que posee mayores valores de la componente horizontal de viento durante estos meses son el 3 con un promedio de 9,2 m/s (33,12 km/h), mientras que el punto 11 solo alcanza los 5,67 m/s (20,41 km/h), por lo que es el de menor aprovechamiento para la generación de energía.

2.3.2 Valores promedio de la componente vertical de la velocidad del viento en los puntos de medición durante los meses de noviembre a marzo

El siguiente gráfico muestra los valores promedio de la componente vertical de la velocidad del viento en cada uno de los puntos de medición.

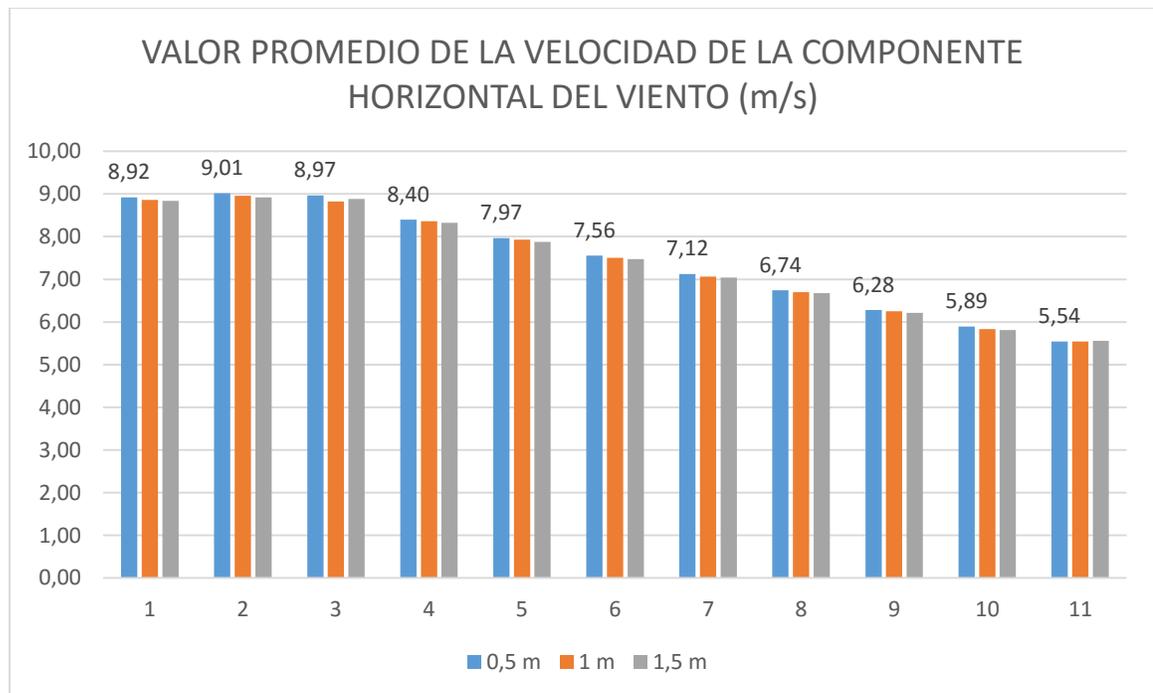


Figura 2.12 Valores promedio de la componente vertical del viento en los puntos de medición

Como se puede apreciar los mayores valores de velocidad del viento se obtienen a 0,5 m, y el punto que posee mayor valor de la componente vertical del viento durante estos

meses son el 2 alcanzando como promedio los 9,01 m/s (32,44 km/h), mientras que el punto 11 solo alcanza los 5,54 m/s (19,94 km/h), por lo que es el de menor aprovechamiento del viento para la generación de energía.

Los mayores valores de la velocidad se obtienen a 2 metros en el eje horizontal y 0.5 metros en el eje vertical, por lo que para aprovechar el mayor potencial del viento los prototipos se colocaran como se muestra a continuación:

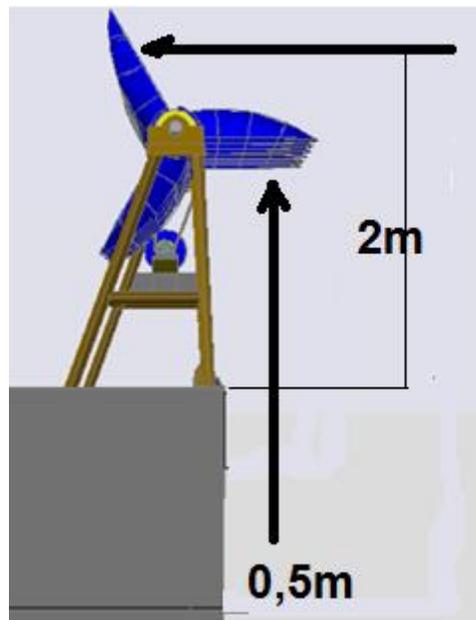


Figura 2.13 Posición final del rotor sobre la azotea del edificio

2.3.3 Cálculo de la potencia eólica disponible

Sobre el álabe del aerogenerador actúan la componente horizontal y vertical del viento, por lo que la potencia eólica disponible en cada punto se calculará a partir de los valores promedio de la velocidad del viento en ambas componentes durante los meses de estudio que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Velocidad promedio entre las dos componentes del viento en los meses de estudio

| PUNTO DE MEDICIÓN | MEDICIONES HORIZONTALES | MEDICIONES VERTICALES | PROMEDIO |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|----------|
|-------------------|-------------------------|-----------------------|----------|

| | | | |
|----|------|------|------|
| 1 | 8,88 | 8,89 | 8,88 |
| 2 | 8,92 | 8,99 | 8,95 |
| 3 | 8,97 | 8,89 | 8,93 |
| 4 | 8,39 | 8,38 | 8,38 |
| 5 | 7,95 | 7,95 | 7,95 |
| 6 | 7,57 | 7,53 | 7,55 |
| 7 | 7,12 | 7,09 | 7,11 |
| 8 | 6,81 | 6,72 | 6,76 |
| 9 | 6,38 | 6,27 | 6,32 |
| 10 | 5,98 | 5,86 | 5,92 |
| 11 | 5,70 | 5,54 | 5,62 |

El área que se utilizará para el cálculo es de 4,73 m², correspondiente al área de impacto del viento, el cuál es un rectángulo de dimensiones 2,78 m x 1,7 m, siendo estas las dimensiones máximas del conjunto rotor del aerogenerador.

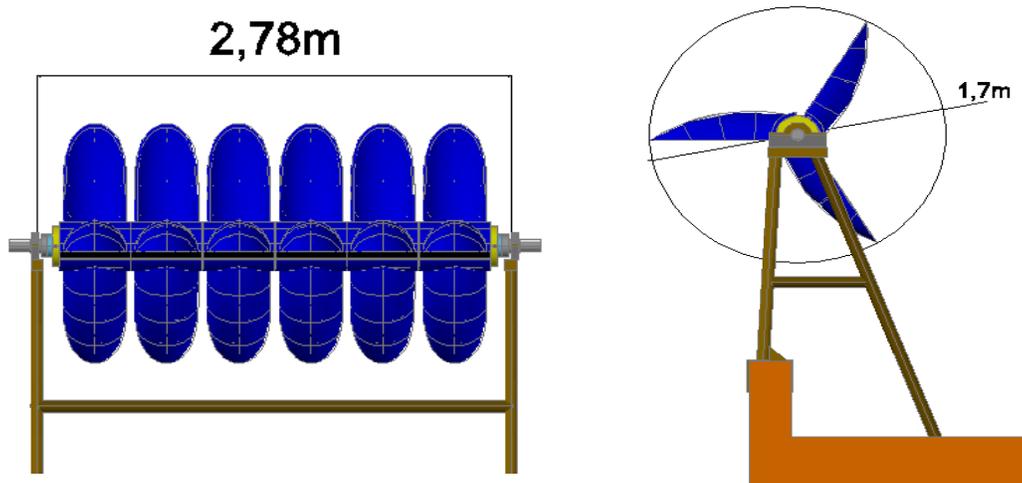


Figura 2.14 Dimensiones máximas del conjunto rotor

Para calcular la potencia eólica disponible se utiliza la ecuación (1.1), se sustituyen los valores y se obtiene:

$$P_{ea} = 0.5 * 0.59 * V^3 * 4.73 * 1.16 \quad (2.1)$$

La siguiente tabla muestra los resultados de la potencia eólica disponible luego de sustituir el valor de la velocidad correspondiente a cada punto de medición.

Tabla 2.2 Potencia eólica disponible en cada punto de medición

| PUNTO DE MEDICIÓN | VELOCIDAD(m/s) | Pe(W) |
|-------------------|----------------|---------|
| 1 | 8,88 | 1134,69 |
| 2 | 8,95 | 1160,56 |
| 3 | 8,93 | 1153,01 |
| 4 | 8,38 | 953,84 |
| 5 | 7,95 | 813,07 |
| 6 | 7,55 | 696,76 |
| 7 | 7,11 | 581,26 |
| 8 | 6,76 | 500,93 |
| 9 | 6,32 | 408,83 |
| 10 | 5,92 | 336,26 |
| 11 | 5,62 | 287,82 |

Los prototipos de aerogeneradores serán instalados en los puntos que poseen una potencia eólica superior a los 349 W. Como se observa en la tabla 2.2 todos los puntos excepto el 10 y 11 poseen una velocidad del viento superior a 6 m/s (21,6 km/h) cumplen con el valor de potencia antes mencionado, por lo que estos últimos serán descartados.

2.4 Análisis de la instalación de aerogeneradores a colocar sobre el edificio

El grupo de investigación de aerogeneradores para zonas urbanas ha desarrollado diferentes variantes de aerogeneradores con álabes toroidales, que han demostrado en trabajos y tesis anteriores [23], un efecto de eficiencia superior a la de los comerciales. Un aspecto de importancia en este modelo a instalar sobre el edificio objeto de estudio, está caracterizado porque es un modelo de eje vertical que se posiciona con el eje horizontal, de manera que la parte del álabe que motiva el torque o giro del rotor quede en la línea de flujo de mayor potencial en la velocidad del viento, es decir, en la parte superior lateral de la azotea, como se puede apreciar en la imagen siguiente:

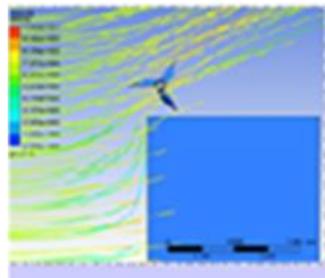


Figura 2.15 Simulación en ANSYS de las líneas de flujo de viento. Fuente: Trabajo de diseño y experimentación del tutor

Sobre la base del estudio de potencial de viento en los diferentes puntos de la azotea, analizados anteriormente, se efectúa el cálculo dimensional que determina la cantidad de rotores y / o módulos de 6 a 12 rotores, de acuerdo con el espacio disponible, que a manera de ejemplo se muestra seguidamente:

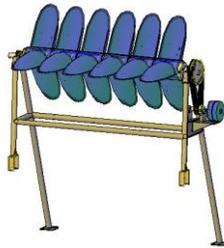


Figura 2.16 Módulo de 6 rotores con sistema de transmisión a instalar sobre el edificio

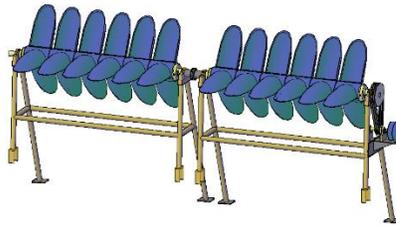


Figura 2.17 Módulo de 12 rotores con sistema de transmisión y acoplamiento entre módulos a instalar sobre el edificio

Teniendo en cuenta el espacio disponible sobre la azotea del edificio y los valores de la velocidad del viento medidos tanto en la componente horizontal como en la componente vertical, como se muestra a continuación se realizó la distribución de los módulos en los puntos que superan como promedio los 6 m/s a lo largo de los meses de estudio:

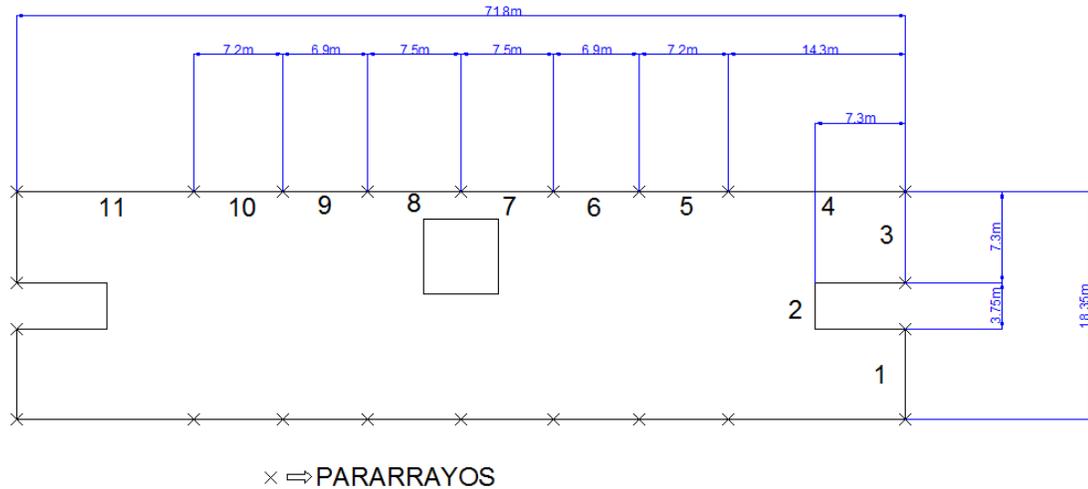


Figura 2.18 Esquema de la vista superior del edificio con los puntos de medición

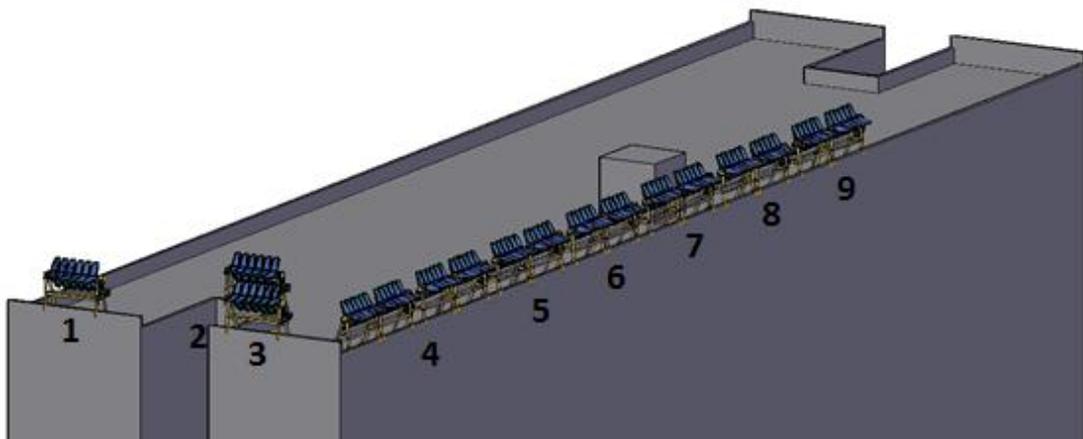


Figura 2.19 Vista superior de la azotea con los módulos de los rotores distribuidos en los puntos de mayor potencial eólico

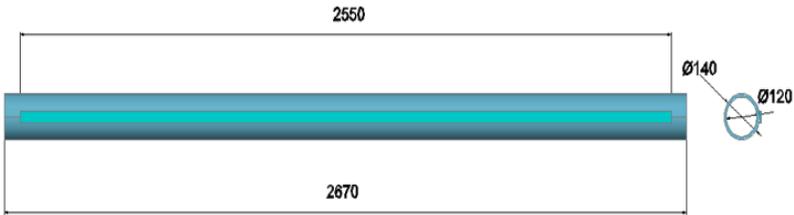
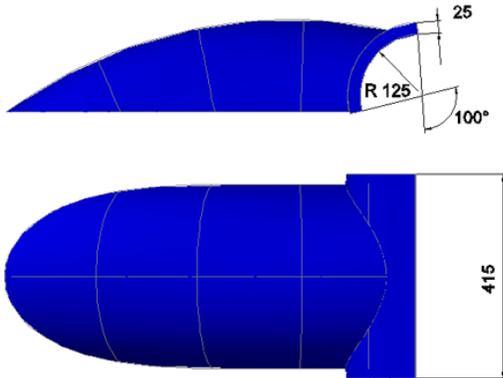
Se puede observar en la imagen de la figura 2.19 que de acuerdo con los puntos donde se verificó un flujo de viento igual a superior a los 6m/s (21,6km/h) se podrán colocar sobre la azotea del edificio un total de 17 módulos de 6 rotores, que en algunos casos se acoplarán en bloques de 12 rotores y evaluando la posibilidad de una generación promedio en cada módulo de 6 rotores de 2,5 kWh, estos aportan la posibilidad de un ahorro en el consumo eléctrico para el edificio de 42,5 kWh, que llevado a 24 horas son 1020 kW, que en un mes representan 24480 kW. Incluso si se considera que el viento en las 24 horas de un día, sufre variaciones durante el día y la noche, por lo que, con un

factor de seguridad de 0,8 de la cifra mensual señalada, el efecto mínimo de ahorro por consumo eléctrico mensual para el edificio sería 19584 kW y en el año 235008 kW, lo cual significa un mínimo de ahorro de 28,4% del consumo promedio de 2019 del edificio.

2.4.1 Estudio de las cargas actuantes sobre la instalación soporte de los aerogeneradores

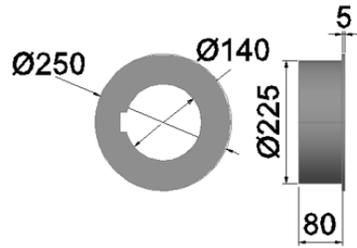
La siguiente tabla muestra los componentes fundamentales que conforman el rotor del aerogenerador:

Tabla 2.3 Elementos que conforman el rotor del aerogenerador

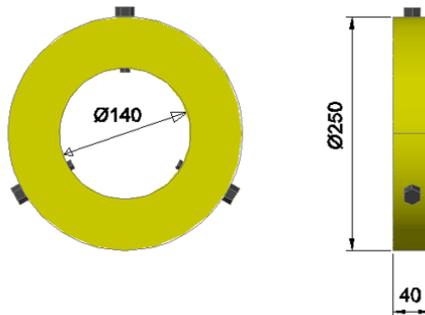
| |
|--|
|  <p>Technical drawing of an aluminum tube. The main length is 2550. A total length of 2670 is indicated, including a section on the right. This section has an outer diameter of Ø140 and an inner diameter of Ø120.</p> |
| <p>Tubo de aluminio 6061 con chaveta atornillada de 10x12x2 550 mm.</p> |
|  <p>Technical drawing of a toroidal blade. The thickness is 25. The radius of the curved part is R 125. The angle of the curved part is 100°. The height of the blade is 415.</p> |
| <p>Álabe toroidal de PRFV (Densidad 1800 kg/m³)</p> |



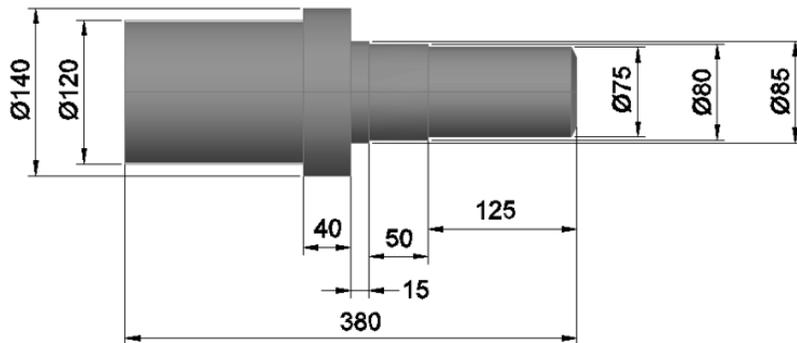
Rolo de Polietileno PE 100 (Densidad 965 kg/m³; Resistencia 35 MPa)



Tapón de rolos PE, de aluminio 6061 (Densidad 2 700 kg/m³)



Anillo de fijación axial: Aluminio 6061 con Prisionero Galvanizado M10X1



Extremos de transmisión del tubo rotor: Aluminio 6061

2.4.2 Cálculo del momento de inercia másico, masa y peso del conjunto rotor

Para los cálculos del momento de inercia másico, la masa y el peso de cada componente que conforman el conjunto rotor se utilizaron las ecuaciones (1.12), (1.6) y (1.5) respectivamente.

- Momento de inercia del tubo de aluminio con respecto al eje de giro.

Datos del tubo de aluminio: $\phi_{ext} = 140mm$; $\phi_{int} = 120mm$; Longitud=2 670 mm

Teniendo en cuenta los datos anteriores se calcula el volumen, la masa y el momento de inercia con respecto al eje de giro obteniendo los siguientes resultados:

$$V = \left[0,7854 \left(0,140^2 - 0,120^2 \right) \right] * 2,67 = 0,0109m^3 \quad (2.2)$$

$$m = 0,0109m^3 * 2700 \frac{kg}{m^3} = 29,44kg \quad (2.3)$$

$$I_x = 0,5mr^2 \quad (2.4)$$

$$I_x = 0,5 * 29,44kg * (0,065m)^2 = 0,062kgm^2 \quad (2.5)$$

- Momento de inercia de la chaveta de aluminio de 10x12x2 550 mm.

Al igual que con el tubo de aluminio primero se calcula el volumen y la masa de la chaveta de aluminio, y después el momento de inercia respecto al eje que pasa por el centro de la chaveta, dado como resultado:

$$V = 0,01 * 0,012 * 2,55 = 0,0003m^3 \quad (2.6)$$

$$m = 0,0003m^3 * 2700 \frac{kg}{m^3} = 0,82kg \quad (2.7)$$

$$I_x = \frac{1}{12} * m \left(0,01^2 + 0,012^2 \right) \quad (2.8)$$

$$I_x = \frac{1}{12} * 0,82kg * 0,000244m^2 = 0,000017kgm^2 \quad (2.9)$$

Aplicando el teorema de Steiner o de los ejes paralelos, se determina el momento de inercia de la chaveta respecto al eje de giro del rotor, mediante la ecuación:

$$I = I_x + md^2 \quad (2.10)$$

En este caso $d=75$ mm, por lo que:

$$I = 0,000017kgm^2 + \left[0,82kg * (0,075m)^2 \right] = 0,0046kgm^2 \quad (2.11)$$

- Momento de inercia de los extremos del tubo.

Ya que los tubos presentan longitud de 380 mm y diferentes diámetros, se simplificará el cálculo aplicando la media de dichos diámetros y la siguiente ecuación de momento de inercia másico:

$$I_x = mr^2 \quad (2.12)$$

El diámetro medio del extremo es 100 mm, a partir de este se calculará su volumen, masa y finalmente el momento de inercia másico como se muestra a continuación:

$$V = 0,7854 * (0,1m)^2 * 0,38 = 0,003m^3 \quad (2.13)$$

$$m = 0,003m^3 * 2700 \frac{kg}{m^3} = 8,1kg \quad (2.14)$$

$$I_x = 8,1kg * (0,5m)^2 = 0,02kgm^2 \quad (2.15)$$

Como son dos los extremos, entonces el momento de inercia es la suma de ambos: 0.04 kgm².

- Momento de inercia másico del tapón de rolos.

En el cálculo se considerará un diámetro exterior medio de 230 mm, diámetro interior de 140 mm y longitud 85 mm. Se calcula el volumen, la masa y el momento de inercia másico del tapón de los rolos.

$$V = 0,7854 \left[(0,23m)^2 - (0,14m)^2 \right] * 0,085m = 0,0022m^3 \quad (2.16)$$

$$m = 0,0022m^3 * 2700 \frac{kg}{m^3} = 6kg \quad (2.17)$$

$$I_x = 6kg * (0,23m)^2 = 1,38kgm^2 \quad (2.18)$$

El aerogenerador de 6 rotores, lleva 12 tapones de rolo, por tanto, el momento de inercia másico a considerar es de: 16,56 kgm².

- Momento de inercia del rolo de PE100, base de los álabes toroidales.

La densidad del PE100 es 950 kg/m³, se procede a calcular el volumen, la masa y el momento de inercia del rolo, quedando como resultados:

$$V = 0,7854 \left[(0,25m)^2 - (0,225m)^2 \right] * 0,415m = 0,0039m^3 \quad (2.19)$$

$$m = 0,0039m^3 * 950 \frac{kg}{m^3} = 3,71kg \quad (2.20)$$

$$I_x = 3,71kg * (0,25m)^2 = 0,232kgm^2 \quad (2.21)$$

El aerogenerador de 6 rotores lleva 6 rolos, por tanto, el momento de inercia másico a considerar es de: 1,39 kgm².

- Momento de inercia del anillo de fijación axial.

Como en los cálculos anteriores primero se determina el volumen, la masa y después el momento de inercia del anillo de fijación axial como se muestra a continuación:

$$V = 0,7854 \left[(0,25m)^2 - (0,14m)^2 \right] * 0,04m = 0,0014m^3 \quad (2.22)$$

$$m = 0,0014m^3 * 2700 \frac{kg}{m^3} = 3,78kg \quad (2.23)$$

$$I_x = 3,78kg * (0,25m)^2 = 0,24kgm^2 \quad (2.24)$$

El árbol rotor lleva dos anillos de fijación axial, por lo que el momento de inercia másico a considerar es: 0,48 kgm².

- Momento de inercia de prisioneros o tornillos de fijación, de anillos, álabes y tapones de rolo.



Figura 2.20 Tornillo hexagonal cuerda corrida grado 2 natural.

Se utilizará tornillo galvanizado de cabeza hexagonal de ½ x 2 ½ pulgadas. Los que serán colocados simétricamente en ángulo circunferencial a 120° y en la cantidad siguiente:

- Fijación de álabes y tapones de aerogenerador de 6 rotores: 90 tornillos.
- Fijación de anillos: 6 tornillos

Densidad: 7860kg/m³

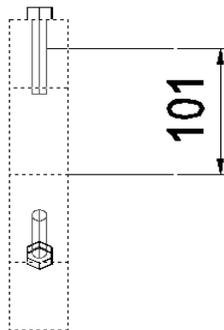


Figura 2.21 Posición de los tornillos de fijación.

Para el cálculo del momento de inercia de los tornillos se utilizarán las ecuaciones que aparecen en el (Anexo 4).

Se ajustan las medidas del tornillo para el cálculo a Ø12 mm y longitud 64 mm.

- Momento de inercia respecto al eje perpendicular al eje del tornillo.

A continuación, se procede a calcular el volumen y la masa del tornillo, así como el momento de inercia respecto al eje perpendicular del tornillo, obteniendo como resultados los valores siguientes:

$$V = \left[0,7854 * (0,012m)^2 \right] * 0,064 = 0,0000072m^3 \quad (2.25)$$

$$m = 0,0000072m^3 * 7860 \frac{kg}{m^3} = 0,057kg \quad (2.26)$$

$$I = \frac{1}{12} m (3a^2 + L^2) \quad (2.27)$$

$$I = 0,083 * 0,057kg \left(3 * (0,006m)^2 + (0,064m)^2 \right) = 0,00002kgm^2 \quad (2.28)$$

- Momento de inercia del tornillo respecto al eje paralelo, es decir al eje de giro del rotor.

$$I_x = 0,00002kgm^2 + \left[0,057kg * (0,101m)^2 \right] = 0,0006kgm^2 \quad (2.29)$$

El momento de inercia total de los 96 tornillos respecto al eje de giro del rotor, es: 0,058 kgm².

- Momento de inercia másico del álabe de PRFV respecto al eje de giro del rotor.

Densidad del PRFV = 1 800 kg/m³.

Aquí se tendrá en cuenta el álabe y la base del mismo, que apoya sobre el rolo de PE, por tanto:

$$V_{\text{álabe}} = 0,42m^2 * 0,015m = 0,0063m^3 \quad (2.30)$$

$$m = 0,0063m^3 * 1800 \frac{kg}{m^3} = 11,34kg \quad (2.31)$$

El momento de inercia del álabe se determina primeramente respecto al eje Y con la ecuación que aparece en el (Anexo 5), que es el paralelo al eje de giro del rotor:

$$I_y = 0,083 * 11,34kg * (0,4m)^2 = 0,15kgm^2 \quad (2.32)$$

El momento de inercia del álabe respecto al eje de giro, requiere la aplicación del Teorema de Steiner o de los ejes paralelos, que es:

$$I_x = 0,15kgm^2 + \left[11,34kg * (0,55m)^2 \right] = 3,58kgm^2 \quad (2.33)$$

El aerogenerador de 6 rotores, tiene 18 álabes toroidales, por lo que el momento de inercia total de los álabes es: 64,44 kgm².

La base del álabe es un sector perimetral, que al expandirse se convierte en un rectángulo para facilitar el cálculo, aplicando lo siguiente:

Perímetro de la circunferencia base es $0,250m * 3,1416 = 0,785m$, entonces el ancho del sector curvo es:

$$\frac{0,785m}{x} = \frac{360^\circ}{100^\circ} \quad (2.33)$$

$$x = \frac{(0,785 * 100)}{360} = 0,218m \quad (2.34)$$

Por lo que el volumen del sector curvo será:

$$V = 0,218m * 0,415m * 0,025m = 0,0023m^3 \quad (2.35)$$

$$m = 0,0023m^3 * 1800 \frac{kg}{m^3} = 4,14kg \quad (2.36)$$

$$I = 0,083 * 4,14kg * (0,109m)^2 = 0,004kgm^2 \quad (2.37)$$

Aplicando Steiner se tiene que:

$$I_x = 0,004kgm^2 + \left[\left(4,14kg * (0,125m)^2 \right) \right] = 0,069kgm^2 \quad (2.38)$$

El aerogenerador de 6 rotores tiene 18 bases curva de los álabes, por tanto, el momento de inercia en este caso es de: $1,24 \text{ kgm}^2$.

Determinados todos los momentos de inercia de las diferentes partes del aerogenerador de 6 rotores de álabes toroidales, el momento de inercia total del conjunto será la suma de todos los valores obtenidos y por tanto el momento de inercia respecto al eje de giro del aerogenerador es de: $84,27 \text{ kgm}^2$.

- Aplicación de la fuerza de torque y el momento de inercia, calculados para el aerogenerador de 6 rotores con álabes toroidales.

Si se considera el factor de aprovechamiento real de la energía eólica, establecido por Betz y se ajusta al momento de torque calculado para los 6 rotores, entonces el valor de $142,8 \text{ Nm}$ del torque derivado de la velocidad del viento y área de enfrentamiento, será:

$$M_t = 142,8 \text{ Nm} * 0,59 = 84,25 \text{ Nm} \quad (2.39)$$

Aplicando la ecuación (1.10), a partir del reposo y con 30 segundos para estabilizar el movimiento, así como el valor del momento de inercia calculado $84,27 \text{ kgm}^2$ se podrá determinar velocidad a la que girará el aerogenerador de 6 rotores y la potencia resultante.

$$I\omega_1 + 84,25 \text{ Nm}(30\text{s}) = I\omega_2 \quad (2.40)$$

Sustituyendo y despejando la ecuación, se tiene que:

$$\omega_2 = \frac{(84,25 \text{ Nm} * 30\text{s})}{84,27 \text{ kgm}^2} = 29,99 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 286 \text{ RPM} \quad (2.41)$$

Para mayor seguridad en los cálculos, atendiendo a que el momento de inercia del aerogenerador, pueden ampliarse por elementos de máquina y valores de posible rozamiento del sistema, se establece un coeficiente de seguridad de 1,2, por lo cual, al aplicarlo al momento de inercia calculado, queda como:

$$84,27 * 1,2 = 101,12 \text{ kgm}^2 \quad (2.42)$$

Al sustituir este valor en la ecuación (2.40), se obtiene el resultado siguiente:

$$\omega_2 = \frac{(84,25Nm * 30s)}{101,12kgm^2} = 24,99 \frac{rad}{s} = 238,6RPM \quad (2.43)$$

Con este resultado se determina la potencia nominal que se puede obtener en la instalación de 6 rotores, con álabes toroidales y diámetro de barrido de 1,7m como se muestra en la figura.

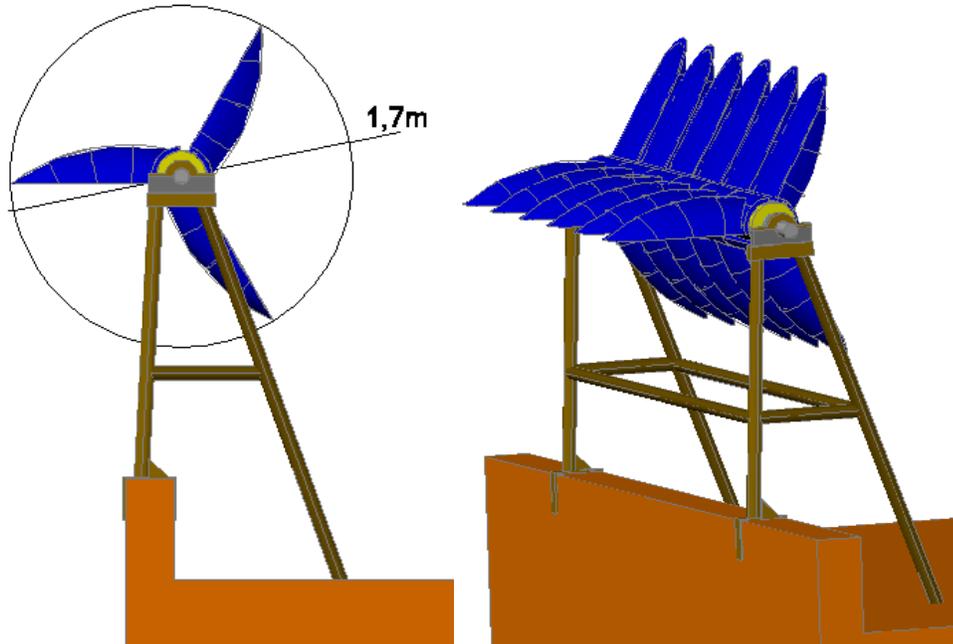


Figura 2.21 Diámetro de barrido

Sustituyendo los valores anteriormente calculados en la ecuación (1.7), se obtiene como resultado:

$$N = 84,25Nm * 24,99 \frac{rad}{s} = 2105,4W \approx 2,1kW \quad (2.44)$$

La instalación cuenta con un total de 3 módulos de 6 rotores y 7 módulos de 12 rotores por lo que la generación de electricidad en una hora será de 35,7 kW.

El peso total del módulo de 6 rotores que soportará la estructura tipo armadura es de 4 440 N que se distribuye en dos puntos de apoyo.

2.5 Selección de los perfiles para fabricación de la armadura

Para la fabricación de la armadura se seleccionó el perfil de tubo circular ya que este debido a su geometría disminuye la acción del viento que actúa sobre la misma. Además, al ser hueco el peso sobre la azotea del edificio sobre el cual estarán colocados los aerogeneradores será menos que con otro tipo de perfil.

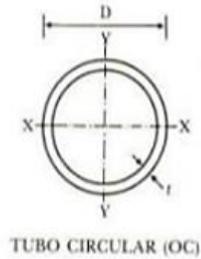


Figura 2.22 Perfil de tubo circular seleccionado para la fabricación de la armadura

El material que se seleccionó para estos perfiles es el acero ASTM 570-85 Grado 30 que se fabrica en la empresa METUNAS. Estos cuentan con un diámetro exterior de 68 mm y un diámetro interior de 60 mm. También se utilizarán para la base de la armadura planchas de acero estructural (AISI 1017) y un espesor de 10 mm.

2.5.1 Cálculo de la fuerza del viento que actúa sobre el aerogenerador

La fuerza del viento que se produce al chocar el flujo de viento contra el aerogenerador es muy importante para los posteriores cálculos de resistencia de la armadura que lo sostendrá. Para el cálculo de dicha fuerza se considerará el área de incidencia del viento el área utilizada en los anteriores cálculos de la potencia eólica, cuyo valor es 4,73 m², correspondiente a las dimensiones máximas del rotor del prototipo de aerogenerador AEROLIN. Así mismo el valor de la velocidad del viento que se adopta como base de cálculo será 7 m/s, mientras que la densidad del aire a una temperatura media de 30 °C que es 1,165 kg/m³.

Sustituyendo estos valores en la ecuación (1.4) se obtiene como resultado:

$$F_v = \frac{1}{2} * 1,165 \frac{kg}{m^3} * \left(7 \frac{m}{s} \right)^2 * 4,73 m^2 \approx 135 N \quad (2.45)$$

2.5.2 Cálculos de resistencia de la armadura

Ya se conoce que el peso total del aerogenerador es 4 440 N. Como la armadura es simétrica, en cada punto de apoyo reposarán 2 220N de peso como se observa a continuación:

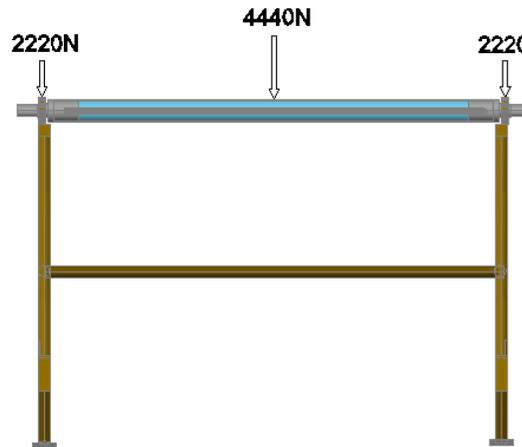


Figura 2.23 Distribución del peso total del rotor en los puntos de apoyo

Se asume que el área de impacto del viento que actúa sobre la estructura soporte del aerogenerador es $4,73 \text{ m}^2$. Esta estará dispuesta de forma perpendicular a la dirección del viento, provocando una mayor presión sobre la estructura, con el objetivo de tener un factor de seguridad en los cálculos que compense la influencia del viento sobre los demás elementos que conforman el aerogenerador.

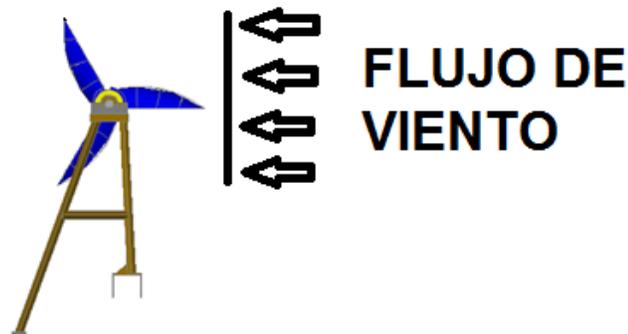


Figura 2.24 Influencia del viento sobre el rotor

Los cálculos serán realizados para una velocidad del viento de 40 m/s (144km/h). Se asume este valor ya que en el edificio está prohibido acceder a la azotea cuando la velocidad del viento sea de 100 km/h o mayor.

Sustituyendo este valor en la ecuación (1.4), se tiene que:

$$F_v = \frac{1}{2} * 1,165 \frac{kg}{m^3} * \left(40 \frac{m}{s}\right)^2 * 4,73m^2 = 4408,36N \quad (2.46)$$

Al ser simétrica la armadura la fuerza del viento será distribuida en los puntos de apoyo del rotor con un valor de 2 204,18 N. A continuación, se muestra las fuerzas que actúan sobre la armadura y se tendrán en cuenta para los cálculos de resistencia de la misma.

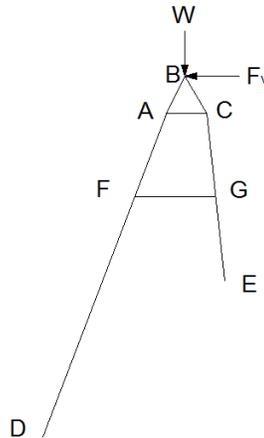


Figura 2.25 Esquema de las fuerzas actuantes sobre la armadura

Es importante conocer que los elementos más cargados en la armadura son la barra AD y CE, por lo que será necesario realizar el análisis de resistencia de estos. A continuación, se procederá a calcular las fuerzas que actúan sobre los elementos AB y BC que representan las distancias existentes desde el eje de rotación del rotor hasta los tubos AD, AC y CE, para lo cual se utilizarán los siguientes esquemas:

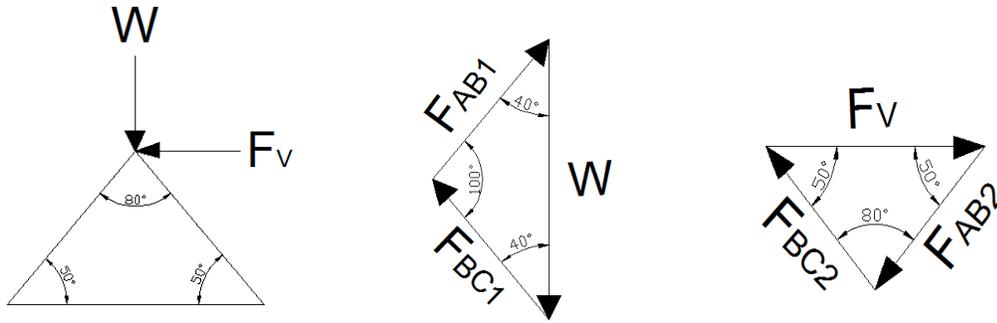


Figura 2.26 Triángulo de fuerzas sobre las barras AB y BC

Aplicando la ley de senos se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{W}{\text{sen}100^\circ} = \frac{F_{BC1}}{\text{sen}40^\circ} = \frac{F_{AB1}}{\text{sen}40^\circ} \quad (2.47)$$

$$\frac{F_v}{\text{sen}80^\circ} = \frac{F_{BC2}}{\text{sen}50^\circ} = \frac{F_{AB2}}{\text{sen}50^\circ} \quad (2.48)$$

Despejando las fuerzas correspondientes a las barras se obtiene como resultado:

$$F_{AB1} = F_{BC1} = \frac{2\,220\text{N} * \text{sen}40^\circ}{\text{sen}100^\circ} = 1\,449,72\text{N} \quad (2.49)$$

$$F_{AB2} = F_{BC2} = \frac{2\,206,18\text{N} * \text{sen}50^\circ}{\text{sen}80^\circ} = 1\,716,1\text{N} \quad (2.50)$$

Conocidos estos valores se calcula el valor de las fuerzas correspondientes a los elementos AB y BC mediante las ecuaciones (1.14) y (1.15) obteniendo como resultado:

$$F_{AB} = F_{AB1} + F_{AB2} = 3\,165,82\text{N} \quad (2.51)$$

$$F_{BC} = F_{BC2} - F_{BC1} = 266,38\text{N} \quad (2.52)$$

A continuación, se muestran los diagramas de fuerzas en los elementos más cargados (AD y CE):

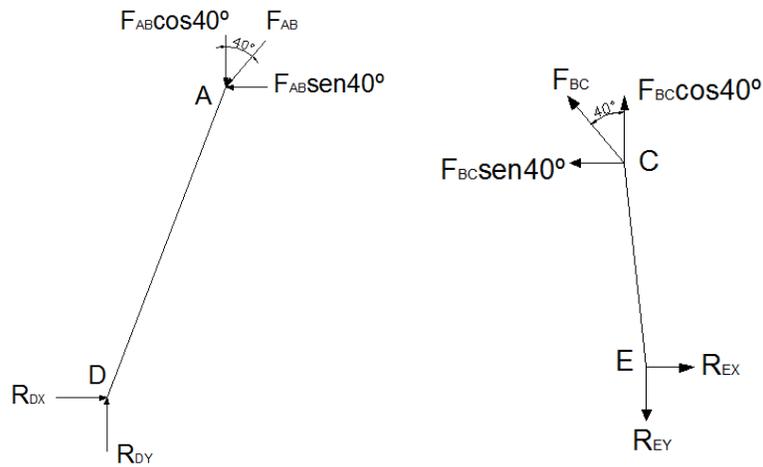


Figura 2.27 Diagrama de fuerzas de las barras AD y CE

Aplicando las ecuaciones (1.14) y (1.15) para calcular las reacciones en los puntos D y E se obtiene:

$$R_{DX} = F_{AB} * \text{sen}40^{\circ} = 2\,034,95N \quad (2.53)$$

$$R_{DY} = F_{AB} * \text{cos}40^{\circ} = 2\,425,16N \quad (2.54)$$

$$R_{EX} = F_{BC} * \text{sen}40^{\circ} = 171,23N \quad (2.55)$$

$$R_{EY} = F_{BC} * \text{cos}40^{\circ} = 204,06N \quad (2.56)$$

Determinado las fuerzas internas en las barras AD y CE:

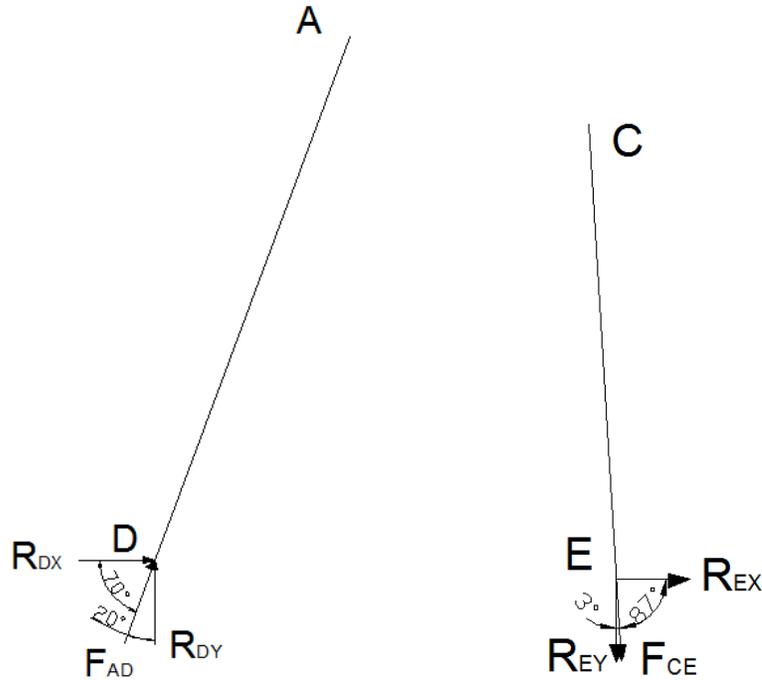


Figura 2.28 Diagrama de fuerzas de las barras AD y CE

Utilizando las ecuaciones (1.14) y (1.15) da como resultado:

$$F_{AD} = R_{DX} * \cos 70^\circ + R_{DY} * \cos 20^\circ = 2\,974,9N \quad (2.57)$$

$$F_{CE} = R_{EX} * \cos 87^\circ + R_{EY} * \cos 3^\circ = 212,74N \quad (2.58)$$

La barra AD estará sometida a compresión y la barra CE a tracción.

2.6 Cálculos de comprobación de resistencia

2.6.1 Comprobación de resistencia a la compresión en tubo AD

A continuación, se muestran los datos del tubo AD, necesarios para los cálculos:

- Diámetro exterior: $D_{EXT} = 68mm$
- Diámetro interior: $D_{INT} = 60mm$
- Longitud: $L = 2\,850mm$

- Momento de inercia: $I = 413\,400\text{mm}^4$
- Área de la sección transversal: $A = 804\text{mm}^2$
- Módulo de Young: $E = 204\,000\text{MPa}$
- Límite de fluencia del material (acero ASTM A570-85): $\sigma_y = 207\text{MPa}$

Utilizando la ecuación (1.19) se tiene que: $r = 22,67\text{mm}$

Como están empotrados ambos extremos del tubo se aplica la ecuación (1.17) con $c_1 = 0,5$, por tanto:

$$L_e = 2850\text{mm} * 0,5 = 1425\text{mm} \quad (2.59)$$

A continuación, se calculará la esbeltez de la columna y la esbeltez crítica mediante las ecuaciones (1.18) y (1.20) respectivamente, valores que serán comparados para considerar la columna como larga o corta según el resultado.

$$\lambda = \frac{1425\text{mm}}{22,67\text{mm}} = 62,86 \quad (2.60)$$

$$c_c = \sqrt{\frac{\pi * 204\,000\text{MPa}}{207\text{MPa}}} = 55,64 \quad (2.61)$$

Como se cumple la condición que $\lambda > c_c$ ($62,86 > 55,64$), la columna se considera corta. Entonces para calcular el esfuerzo crítico se utilizará la ecuación (1.25) con un factor de seguridad igual a 1,91, dando como resultado:

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 * 204\,000\text{MPa}}{(62,86)^2} = 509,54\text{MPa} \quad (2.62)$$

Luego es necesario calcular el esfuerzo admisible y la fuerza admisible aplicando las ecuaciones (1.21) y (1.22). Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\sigma_{adm} = \frac{509,54MPa}{1,91} = 266,77MPa \quad (2.64)$$

$$P_{adm} = 266,77MPa * 804mm^2 = 214483,08N \quad (2.65)$$

La fuerza aplicada sobre la columna AD es 2 974,9 N; como se cumple la condición que $P_{adm} > P$ (214 483,08 N > 2 974,9 N), se puede decir que la sección de la columna AD resiste las cargas que actúan sobre ella.

2.6.2 Comprobación de resistencia a la tracción en el tubo CE

Es necesario conocer que el límite de fluencia del material es 207 MPa y el factor de seguridad asumido para los cálculos de comprobación es 1,5. El tubo CE tiene un área de sección transversal de 804 mm² y está sometido a una fuerza de 212,74 N.

Utilizando las ecuaciones (1.27) y (1.28) se calcula y comprueba la resistencia a la tracción de la barra CE:

$$\sigma_{adm} = \frac{207MPa}{1,5} = 138MPa \quad (2.66)$$

$$\sigma_{adm} \geq 0,26MPa \quad (2.67)$$

Como se cumple que esta condición se puede afirmar que la barra CE resiste la fuerza de tracción a la que está sometida.

2.6.3 Comprobación de resistencia a cortante de los tornillos en estructura soporte

Para el anclaje de la estructura soporte del aerogenerador se seleccionaron tornillos M-16 de grado 4.6. Estos son recomendados por la norma ISO 898-1 para la unión de estructuras de acero.

Para lograr que el aerogenerador esté correctamente nivelado, se construirán pedestales de concreto sobre la azotea del edificio, a los que se fijará la armadura mediante los

tornillos antes mencionados. En la siguiente figura se muestra cómo será la fijación de la armadura al edificio y las fuerzas que actúan sobre estos puntos de apoyo.

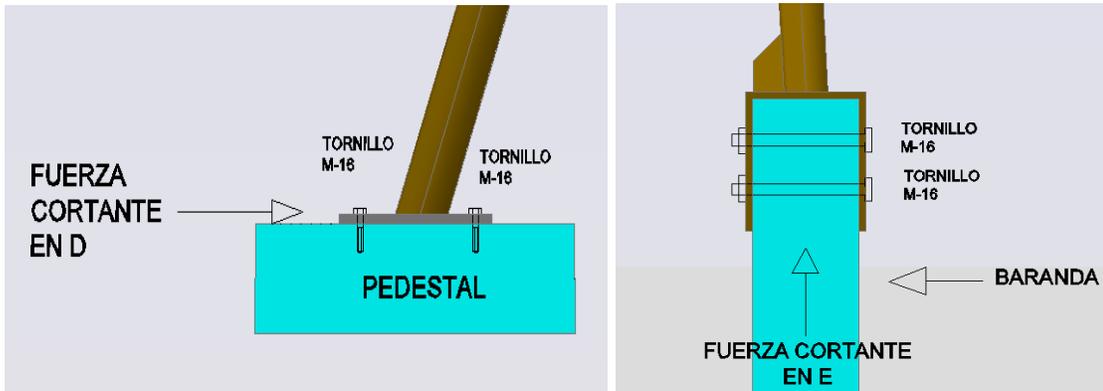


Figura 2.29 Fijación de la armadura y fuerzas actuantes sobre los puntos de apoyo

Para los cálculos de resistencia nos basaremos en los puntos de los esquemas del epígrafe anterior, por lo que el apoyo sobre el pedestal se denotará con la letra D y el apoyo sobre la baranda con la E.

La unión de la armadura al pedestal se realizará mediante 4 tornillos M-16 grado 4.6 con 80 mm de longitud y su resistencia a cortante es 38,60 MPa. La fuerza que actúa sobre estos y tiende a cortarlos es la reacción en D, correspondiente al eje X (R_{DX}) que se calculó anteriormente, con un valor de 2 034,95 N. Aplicando la ecuación (1.27) se calcula y comprueba la resistencia a cortante de los tornillos, dando como resultado:

$$\sigma_{adm} \geq 2,54MPa \quad (2.68)$$

Esta condición se cumple ya que $38,60 MPa \geq 2,54 MPa$; de esta forma podemos afirmar que la unión por tornillos en el punto D resiste los esfuerzos a cortante a los que está sometido.

Para fijar la armadura a la baranda del edificio se utilizarán 2 tornillos M-16 grado 4.6 con 200 mm de longitud. El área de la sección transversal de estos es 200 mm^2 y su resistencia a cortante es 38,60 MPa. La fuerza que actúa sobre los tornillos y tiende a cortarlos es la reacción en E, correspondiente al eje Y (R_{EY}) que se calculó anteriormente,

con un valor de 204,06 N. Aplicando la ecuación (1.27) se calcula y comprueba la resistencia a cortante de los tornillos, dando como resultado:

$$\sigma_{adm} \geq 0,51MPa \quad (2.69)$$

Esta condición se cumple ya que $38,60 \text{ MPa} \geq 0,51 \text{ MPa}$; de esta forma podemos afirmar que la unión por tornillos en el punto E resiste los esfuerzos a cortante a los que está sometido.

2.6.4 Comprobación de resistencia de los álabes

La fijación de los álabes al tubo de polietileno será mediante 4 tornillos galvanizados de cabeza hexagonal de $\frac{1}{2} \times 2 \frac{1}{2}$ pulgadas como se muestra a continuación:

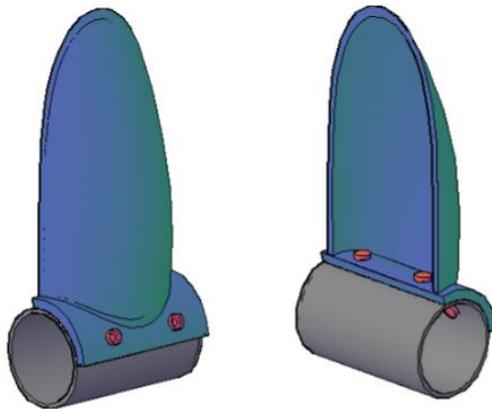


Figura 2.30 Fijación de los álabes al tubo de polietileno

Al igual que en los cálculos anteriores se comprobará la resistencia de los álabes y los tornillos de fijación para una velocidad del viento de 40 m/s (144km/h).

Primero es necesario realizar un análisis estático del álabe sobre el que actúa la fuerza del viento provocada al chocar el flujo de aire con la superficie interior cóncava del toroide y el peso del álabe. En el siguiente esquema se aprecian los puntos de aplicación de las fuerzas, así como las reacciones que estas provocan.

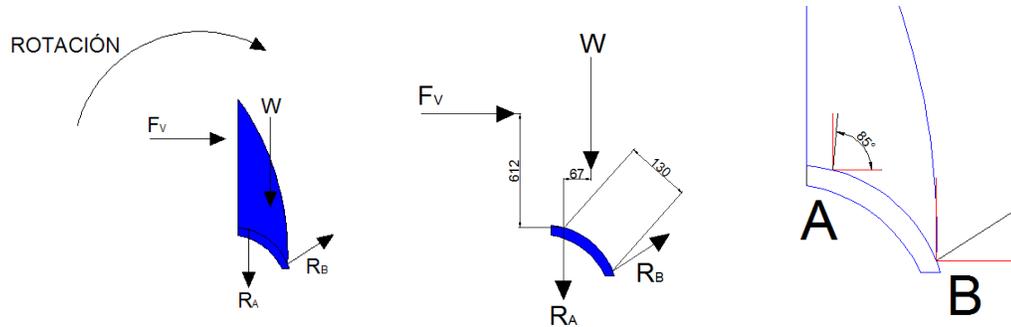


Figura 2.31 Análisis de las fuerzas en los álabes

Haciendo momento en el punto A y aplicando la ecuación (1.16) se obtiene:

$$0 = -F_v (0,612m) - W_a (0,067m) + R_B (0,13m) \quad (2.70)$$

Después de despejar la reacción en el punto B y sustituir los valores se tiene que:

$$R_B = \frac{((593,68N * 0,612m) + (112N * 0,067m))}{0,13m} = 2852,5N \quad (2.71)$$

El siguiente esquema muestra las componentes de las fuerzas en los puntos A y B:

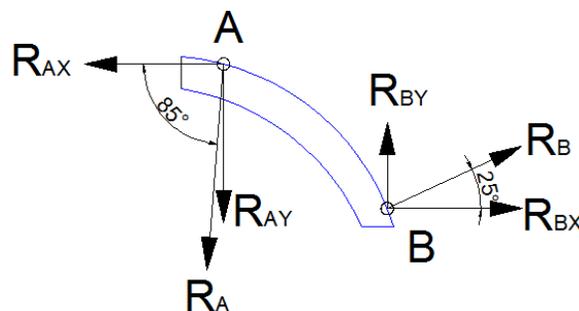


Figura 2.32 Componentes de las fuerzas en los puntos A y B

Para trasladar las reacciones a sus componentes en los ejes (X) y (Y), es necesario aplicar las siguientes ecuaciones:

$$R_{BY} = R_B * \text{sen}25^\circ \quad (2.62)$$

$$R_{BX} = R_B * \cos 25^\circ \quad (2.63)$$

Sustituyendo en estas ecuaciones se obtiene:

$$R_{BY} = 2852,5N * \text{sen}25^\circ = 1205,5N \quad (2.64)$$

$$R_{BX} = 2852,5N * \cos 25^\circ = 2585,24N \quad (2.65)$$

Aplicando las ecuaciones (1.14) y (1.15):

$$F_V - R_{AX} + R_{BX} = 0 \quad (2.66)$$

$$-W_a - R_{AY} + R_{BY} = 0 \quad (2.67)$$

Despejando R_{AX} y R_{AY} y sustituyendo los valores:

$$R_{AX} = F_V + R_{BX} = 593,68N + 2585,24N = 3178,92N \quad (2.68)$$

$$R_{AY} = -W_a + R_{BY} = -112N + 1205,5N = 1093,5N \quad (2.69)$$

Es importante conocer que las fuerzas que actúan en los puntos de apoyo se distribuyen en función del número de tornillos (2 interiores y 2 exteriores). Para realizar la comprobación a resistencia de los álabes es necesario conocer el área más peligrosa, ya que a medida que aumente la velocidad del viento, aumentará la fuerza que actúa sobre estos, así como el efecto de la fuerza centrífuga, la cual puede provocar la rotura o desprendimiento de los álabes por esta zona.

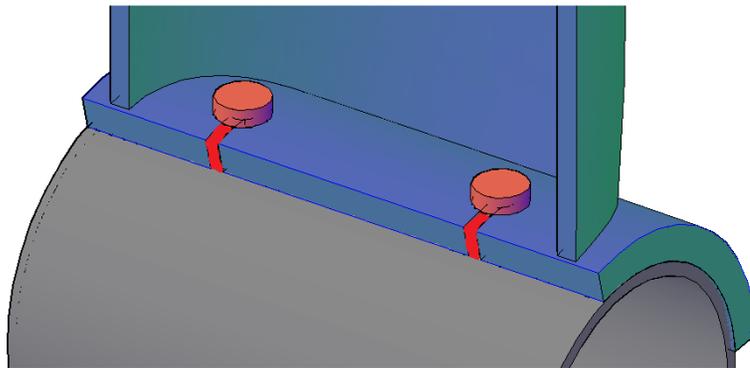


Figura 2.33 Sección más peligrosa en el álabe

El punto A ubicado en los tornillos que se fijan en la parte interior del álabe es donde actúa la mayor fuerza. Su dirección señala un esfuerzo cortante para el tornillo y la sección más peligrosa en la abrazadera del álabe.

El área representada en rojo corresponde a la sección más peligrosa en el álabe y es de 34 x 25 mm en los laterales de los dos tornillos interiores. Con el objetivo de tener un coeficiente de seguridad mayor no se tendrá en cuenta el efecto de fijación de los tornillos exteriores para los cálculos de resistencia. Esto da como resultado que el área en cada lateral sea de: 850 mm² (0,000 85 m²).

A continuación, se muestra el cálculo del valor de (Q), ya que la ecuación de esfuerzo depende de este parámetro.

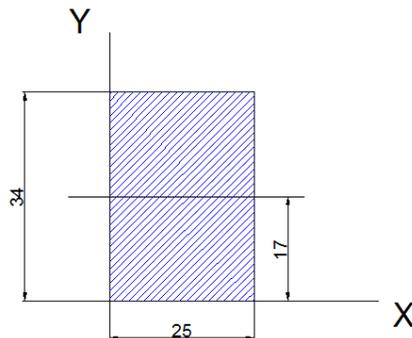


Figura 2.34 Parámetros para buscar los valores (Q y I_x)

$$t = 0,025m \quad (2.70)$$

$$Q = 0,00085m^2 * 0,017m = 1,44 \times 10^{-5} m^3 \quad (2.71)$$

$$I_x = \frac{1}{3}(0,034)^3 * (0,025) = 3,24 \times 10^{-7} m^4 \quad (2.72)$$

La fuerza en el punto A es de 1 093,5N; la que se distribuye en los cuatro laterales interiores con un valor de 273,37N. Aplicando la ecuación (1.29) se obtiene como resultado:

$$\tau = \frac{273,37N * 1,44 \times 10^{-5} m^3}{3,24 \times 10^{-7} m^4 * 0,025} = 485991,1Pa = 0,48MPa \quad (2.73)$$

El esfuerzo cortante es aproximadamente 0,6 del esfuerzo a la tracción. El material utilizado para la construcción del álabe es plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Este posee una resistencia a tracción transversal entre 10 y 70 MPa, por lo que la resistencia de este material a esfuerzos cortantes será de 6 a 42 MPa. Entonces como se cumple que $0,48 \text{ Mpa} \leq 6 \text{ Mpa}$ se puede afirmar que el álabe resistirá a estos esfuerzos.

Como consecuencia del giro del rotor se genera una fuerza centrífuga que tiende a desprender el álabe, la cual será mayor mientras mayor sea la velocidad a la que gira el rotor.

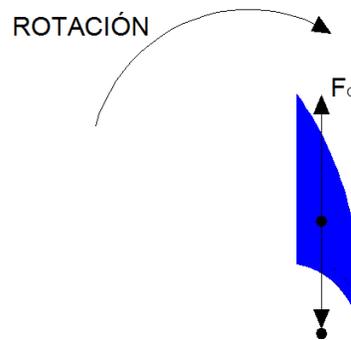


Figura 2.35 Fuerza centrífuga (F_c).

La masa del álabe es 11,35 Kg como se conoce se epígrafes anteriores, el radio de barrido de los álabes es de 0,762 m y el rotor gira a 635 RPM (11,08 rad/s) con una velocidad del viento de 40 m/s (144 km/h). Con estos valores y utilizando la ecuación (1.13) se tiene como resultado:

$$F_c = 11,35kg * 11,08 \frac{rad}{s} * 0,762m = 95,83N \quad (2.74)$$

Tomando esta fuerza como esfuerzo cortante en las secciones laterales de los 4 tornillos, se distribuye entre 8 en este caso, la fuerza en la sección será 11,98 N.

Utilizando la ecuación (1.29) se tiene que:

$$\tau = \frac{95,83N * 1,44 \times 10^{-5} m^3}{3,24 \times 10^{-7} m^4 * 0,025} = 170364,4 Pa = 0,17 MPa \quad (2.75)$$

Este esfuerzo producido por la fuerza centrífuga es menor que el anteriormente calculado, por lo que se puede afirmar que utilizando el plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para su fabricación de los álabes estos resisten los esfuerzos generados por vientos de 40 m/s (144km/h).

2.6.5 Comprobación de resistencia de las uniones soldadas

Como ya se dijo en el capítulo anterior la unión de los elementos que conforman la estructura soporte del aerogenerador se realizará mediante soldadura por arco eléctrico, para lo cual se utilizará el electrodo E-6013.

El punto más crítico en la armadura es el apoyo A, por lo que es en este punto donde se realizará el cálculo de comprobación de resistencia. Se tienen como datos, P=3 178,92 N, N=1, L=213,62 mm y h_c=4 mm por lo que h=2,828 mm; utilizando la ecuación (1.30) se obtiene como resultado:

$$\tau = \frac{3178,92N}{2,828mm * 213,62mm * 1} = 5,26 MPa \quad (2.76)$$

Como el esfuerzo admisible es 227 MPa y se cumple que 227 MPa ≥ 5,26 MPa; la soldadura va a resistir la fuerza aplicada en el punto crítico.

2.7 Pedestales y selección del acoplamiento entre rotores

Como se dijo anteriormente para lograr que el aerogenerador esté correctamente nivelado y así garantizar su correcto funcionamiento se fabricarán pedestales de concreto sobre los cuales irá el aerogenerador. Estos serán construidos utilizando cemento P 350 y barras de

acero de 3/8 que irán ancladas en la azotea del edificio. La altura de los pedestales se seleccionará en función de la irregularidad de la azotea del edificio. Además, es muy importante colocar gomas anti vibratorias para evitar que las vibraciones generadas por el aerogenerador afecten la estructura del edificio. Se utilizarán la plancha tipo AVP- P2, con 14 mm de espesor. Estas se caracterizan por ser insensibles al agua y sales, además de poseer alta resistencia a la intemperie. Se pueden ver sus características en el (Anexo 6).

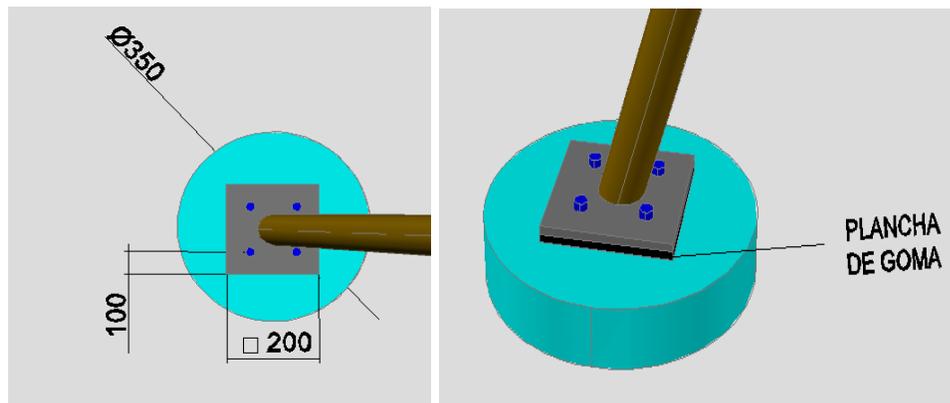


Figura 2.36 Pedestales de concreto y plancha de goma

2.7.1 Selección del acoplamiento entre rotores

Siempre que el espacio sobre la azotea lo permita se instalarán módulos de 12 rotores. El acoplamiento entre los módulos de 6 rotores será mediante acoplamientos rígidos como el que se muestra en la siguiente figura.

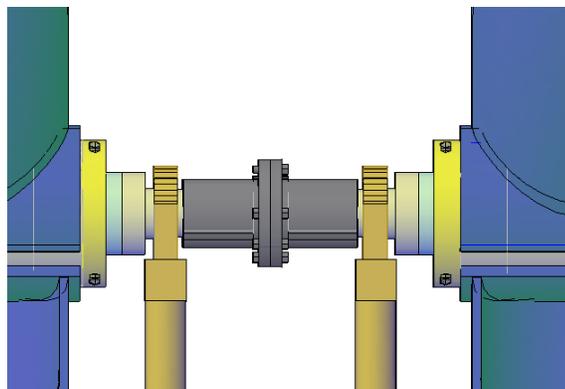


Figura 2.37 Acoplamiento entre rotores

2.8 Cálculo del sistema de transmisión por correas

Los módulos de 6 y 12 rotores que conforman la instalación con una velocidad de 7 m/s giran a 238 RPM \approx 249 RPM, mientras que la velocidad de rotación de los generadores es de 300 RPM, partiendo de estos datos se utilizará en el sistema de transmisión por correas una polea conductora con diámetro de 280 mm ($D_1=280$ mm), por lo que aplicando la ecuación (1.31) se obtiene como resultado:

$$D_2 = \frac{280\text{mm} * 249\text{RPM}}{300\text{RPM}} = 232,4\text{mm} \approx 233\text{mm} \quad (2.77)$$

En la siguiente figura se muestra el sistema de transmisión con la polea conductora de diámetro 280 mm ($D_1=280$ mm) y la polea conducida de diámetro 233 mm ($D_2=233$ mm).

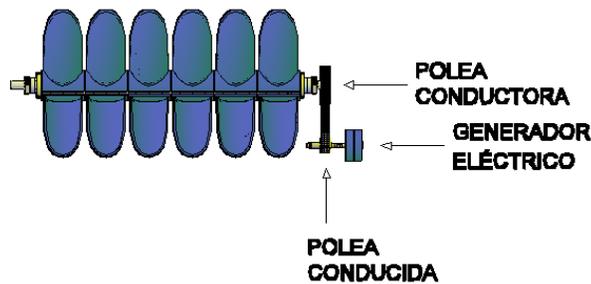


Figura 2.38 Esquema de la transmisión por correas

Utilizando para la transmisión poleas con los diámetros mencionados anteriormente se logra la velocidad de rotación de los generadores eléctricos que se van a utilizar en la transmisión.

Para el cálculo de la potencia que se puede producir con una velocidad del viento de 7 m/s (25,2 km/h) se tomará el generador eléctrico modelo NE- 3KPG de 3000 W (3 kW), el módulo de 6 rotores y los siguientes datos: $D_1=280$ mm; $n_1=249$ RPM; $\omega_1=26,07$ rad/seg; $N_1=2195$ W; $Mt_1=84,2$ Nm; $D_2=233$ mm, $n_2=300$ RPM; $\omega_2=31,41$ rad/seg.

Aplicando la ecuación (1.8) se puede calcular la fuerza tangencial que ejerce la correa sobre las poleas, dando como resultado:

$$P_1 = \frac{84,2Nm}{0,140m} = 601,43N \quad (2.78)$$

Conociendo el valor de la fuerza tangencial en la p Polea conducida y teniendo en cuenta que $P_1 = P_2 = 673,6 \text{ N}$; se calcula el valor del momento torsor de la p Polea conducida mediante la ecuación (1.8), se obtiene:

$$M_{t2} = 601,43N * 0,1165m = 70,07Nm \quad (2.79)$$

Luego se utiliza la ecuación (1.7) para calcular la potencia que puede lograr el generador, se obtiene como resultado:

$$N_2 = 70,07Nm * 31,41rad / s = 2200,9W = 2,2kW \quad (2.80)$$

Con el resultado obtenido se puede afirmar que el generador eléctrico NE- 3KGP con 3 000 W de potencia se puede utilizar para los módulos de 6 rotores.

A continuación, se realizará el cálculo de la transmisión para el módulo de 12 rotores y el generador eléctrico NE- 5KPGP de 5 000 W (5 kW) a partir de los siguientes datos: $D_1=280 \text{ mm}$; $n_1=233 \text{ RPM}$; $\omega_1=26,07 \text{ rad/seg}$; $N_1=4\ 390 \text{ W}$; $M_{t1}=168,4 \text{ Nm}$; $D_2=233 \text{ mm}$, $n_2=300 \text{ RPM}$; $\omega_2=31,41 \text{ rad/seg}$. Se sigue el mismo procedimiento de cálculo utilizado para el módulo de 6 rotores y se obtiene como resultado:

$$P_1 = P_2 = \frac{168,4Nm}{0,140m} = 1202,86N \quad (2.81)$$

$$M_{t2} = 1202,86N * 0,1165m = 140,13Nm \quad (2.82)$$

$$N_2 = 140,13Nm * 31,41 \frac{rad}{seg} = 4401,48W = 4,4kW \quad (2.83)$$

Con el resultado obtenido se puede afirmar que el generador eléctrico NE- 5KGP con 5 000 W de potencia se puede utilizar para los módulos de 12 rotores.

La correa trapezoidal de perfil B es la que se utilizará para la transmisión de los módulos de 6 y 12 rotores, Su geometría se puede ver en el (Anexo 7).

Para permitir el montaje y desmontaje de la correa con facilidad el generador eléctrico puede desplazarse 200 mm como se muestra en la siguiente figura.

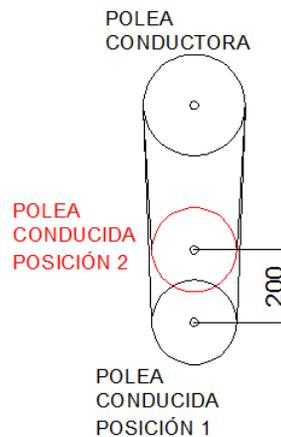


Figura 2.39 Posiciones de la polea conducida desplazando el generador

Para los cálculos se tomará 612,5 mm como distancia entre centros tentativa promedio (A_{tent}). Aplicando la ecuación (1.32) para conocer la longitud de la correa se tiene como resultado:

$$L_{correa} = 2 * 612,5mm + \frac{\pi}{2} (233mm + 280mm) + \frac{(233mm - 280mm)^2}{4 * 612,5mm} = 2031,72mm \quad (2.84)$$

Utilizando la tabla que aparece en el catálogo de correas industriales, marca Dumlop, se selecciona la correa trapezoidal B79, con una longitud normalizada de 2 043 mm ($L_n=2\ 043\ mm$), como se puede observar en el (Anexo 8).

La distancia entre centro real de la transmisión se determinará aplicando la ecuación (1.33), donde se obtiene como resultado:

$$A_{wreal} = 612,5mm + \frac{2043mm - 2031,72mm}{2} = 618,14mm \quad (2.85)$$

Para mayor seguridad en la transmisión se utilizarán 2 correas de las antes seleccionadas.

2.9 Conexión de los aerogeneradores a la red del edificio

Será necesario adaptar la energía producida por los aerogeneradores de la instalación a la red del edificio, para lo cual son necesarios una serie de dispositivos. Los generadores de imanes permanentes que se utilizarán son de la marca Naier, modelo NE-3KPG y NE-5KGP, para los módulos de 6 y 12 rotores respectivamente. Además, como ya se dijo en el capítulo anterior se seleccionó el inversor Ingecon® Wind con transformador de 3.3 y 5 kW para tratar de conseguir la mayor cantidad de energía y garantizar la seguridad de la instalación.

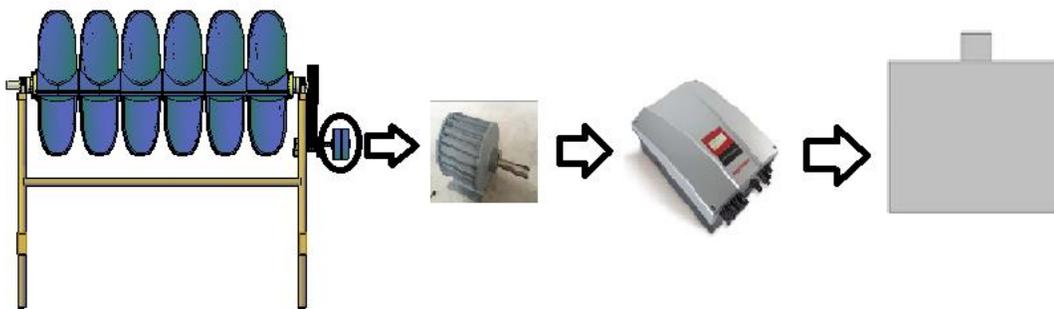


Figura 2.40 Esquema de conexión a la red del edificio

Teniendo en cuenta todo esto se realizó en esquema donde se muestra las conexiones a cada uno de los módulos que conforman la instalación.

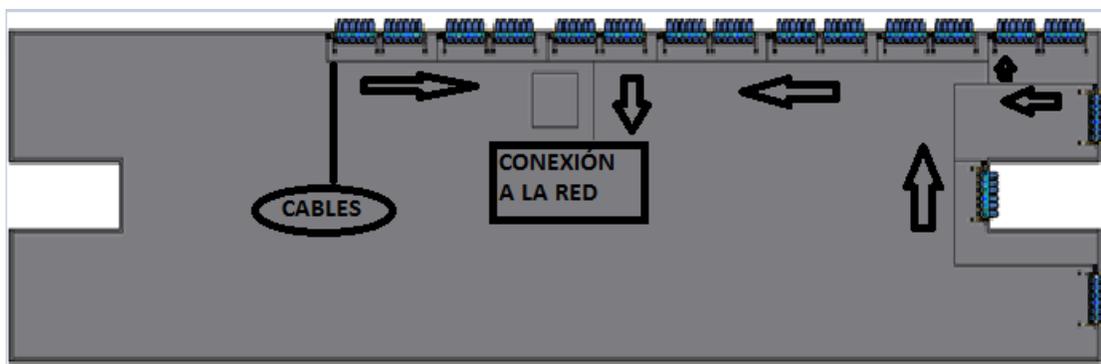


Figura 2.41 Esquema de conexión a la red de la instalación

2.10 Método anticorrosivo aplicado a las estructuras

La instalación al estar ubicada en una zona muy cercana a la costa es afectada en gran medida por el aerosol marino, el cual actúa como catalizador en el proceso de corrosión de las estructuras metálicas. Por esta razón se aplicará la pintura anticorrosiva Lanco como método de protección. Se aplicarán dos capas mediante el método de pintado tradicional con brocha. El objetivo de esta pintura es impedir la oxidación de las superficies metálicas de la instalación y, a su vez, ofrecer las condiciones propicias para ser pintadas con otras pinturas de acabado. Con esto garantizará la protección de la estructura durante 5 años sin la necesidad de mantenimiento, y contribuirá a alargar la vida útil de la instalación. Para cubrir todas las superficies metálicas de la instalación serán necesarias 6 latas de esta pintura.



Figura 2.42 Lata de pintura Lanco

A continuación, se muestran algunas características de la pintura Lanco:

- Fácil de aplicar.
- Alto poder anticorrosivo.
- Excelente adherencia.
- Secado rápido.
- Puede ser recubierta con pinturas de acabado.
- No necesita ser diluida para su aplicación.

Conclusiones del Capítulo 2

- La instalación estará compuesta por tres módulos de 6 rotores y siete módulos de 12 rotores, que generan 2,1 y 4,2 kW respectivamente, con una velocidad del viento de 7 m/s.
- El consumo eléctrico total del edificio en el año es de 825 475 kW.
- Los perfiles tubulares de acero ASTM A570-85 Grado 30 seleccionados para la fabricación de la estructura soporte del aerogenerador resistirán la fuerza del viento y el peso del rotor con velocidades del viento de 40 m/s (144 km/h).
- Los tornillos M-16 utilizados para fijar el aerogenerador al edificio resisten los esfuerzos cortantes generados por velocidades del viento de 40 m/s (144 km/h).
- Los álabes fabricados con PRFV no se desprenderán del rotor con valores de velocidad del viento hasta 40 m/s (144 km/h).
- La unión por soldadura con arco eléctrico de los elementos que conforman la armadura utilizando electrodos E-6013 resistirá las fuerzas que generadas por la velocidad del viento de 40 m/s (144 km/h).
- Debido a la irregularidad de la superficie de la azotea del edificio se construirán pedestales de concreto para lograr el correcto funcionamiento de los rotores en los módulos de 12 rotores.
- Se emplearán gomas vibratorias del tipo AVP-P2 para evitar afectaciones en la estructura del edificio.
- Para unir los ejes de los rotores en los módulos de 12 rotores se utilizará un acoplamiento rígido.

- En la transmisión por correas se utilizarán dos correas trapezoidales del tipo B79, con una longitud de 2 043 mm; dos poleas con diámetros $D_1=280$ mm y $D_2=233$ mm; y distancia entre centros de 618,14 mm.
- Para lograr que la energía producida por el aerogenerador sea llevada a la red del edificio se utilizarán generadores eléctricos de la marca Naier, modelo NE-3KPG y NE-5KGP, para los módulos de 6 y 12 rotores respectivamente, y el inversor Ingecon® Wind Interface (IWI).
- Para la protección anticorrosiva de todas las superficies metálicas de la instalación se utilizarán 6 latas de la pintura anticorrosiva Lanco, aplicando dos capas mediante el método de pintado tradicional con brocha.

Capítulo 3 Análisis de los resultados obtenidos y del costo de la instalación

Este capítulo tiene como objetivo analizar los resultados obtenidos en los cálculos del capítulo 2. Además, se realizará un análisis económico del costo de la instalación, así como el aporte de esta al edificio y el tiempo de recuperación de la inversión a realizar.

3.1 Análisis de los parámetros de trabajo y la potencia generada por los módulos de 6 y 12 rotores para velocidades del viento hasta 40 m/s (144 km/h)

En el capítulo anterior se realizaron los cálculos del momento torsor, la velocidad de rotación y la potencia generada por un módulo de 6 rotores para una velocidad del viento promedio de 7 m/s (25,2 km/h). A continuación, se muestra en una tabla como varían estos parámetros para velocidades del viento hasta los 40 m/s (144 km/h).

| V m/s | V km/h | RPM de 6 y 12 rotores | Mt (Nm) 6 rotores | Mt (Nm) 12 rotores | Potencia (kW)6 rotores | Potencia (kW)12 rotores |
|-------|--------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| 3 | 10,8 | 43,81 | 15,46 | 30,92 | 0,07 | 0,014 |
| 4 | 14,4 | 77,89 | 27,49 | 54,98 | 0,22 | 0,44 |
| 5 | 18 | 121,7 | 42,96 | 85,92 | 0,54 | 1,08 |
| 6 | 21,6 | 175,25 | 61,86 | 123,72 | 1,13 | 2,26 |
| 7 | 25,2 | 238,53 | 84,2 | 168,4 | 2,1 | 4,2 |
| 8 | 28,8 | 311,55 | 109,97 | 219,94 | 3,59 | 7,18 |
| 9 | 32,4 | 394,31 | 139,18 | 278,36 | 5,7 | 11,4 |
| 10 | 36 | 486,8 | 171,83 | 343,66 | 8,76 | 17,52 |
| 11 | 39,6 | 589,03 | 207,91 | 415,82 | 12,82 | 24,32 |
| 12 | 43,2 | 700,99 | 247,43 | 494,86 | 18,16 | 36,32 |
| 13 | 46,8 | 822,69 | 290,39 | 580,79 | 25,01 | 50,02 |
| 14 | 50,4 | 954,13 | 336,78 | 673,56 | 33,65 | 67,3 |
| 15 | 54 | 1095,3 | 386,61 | 773,22 | 44,34 | 88,68 |
| 16 | 57,6 | 1246,21 | 439,88 | 879,76 | 57,4 | 114,8 |
| 20 | 72 | 1947,2 | 687,32 | 1374,64 | 140,15 | 208,3 |

| | | | | | | |
|----|-----|--------|---------|---------|---------|---------|
| 30 | 108 | 4381,2 | 1546,46 | 3092,92 | 709,51 | 1419,02 |
| 40 | 144 | 7788,8 | 2749,26 | 5498,52 | 2242,42 | 4484,84 |

Como se puede observar la velocidad de rotación de ambos módulos va a ser la misma, mientras que el momento torsor y la potencia de los módulos de 12 rotores es el doble de los módulos de 6 rotores. Estos valores pueden ser utilizados en futuras instalaciones donde la velocidad promedio del viento coincidan con las mostradas anteriormente.

3.2 Análisis de resistencia de la armadura y los elementos que conforman el aerogenerador

Los cálculos de resistencia fueron realizados para una velocidad del viento de 40 m/s (144 km/h). Utilizando para la construcción de la armadura que soportará el aerogenerador tubos de acero ASTM A570-85 Grado 30 con diámetro interior y exterior de 60 y 68 mm respectivamente se garantiza su resistencia bajo estas condiciones. Al mismo tiempo los álabes serán fabricados de PRFV para evitar que estos se desprendan del tubo de polietileno al cual están unidos. Es importante que la resistencia a esfuerzos cortantes del PRFV que se va a emplear sea mayor que 8,1 MPa. Aunque utilizando estos materiales se logra que el aerogenerador en su conjunto resista velocidades del viento hasta los 40 m/s (144 km/h), se recomienda desmontar la instalación cuando sea anunciado que la velocidad del viento superará los 100 km/h (27,8 m/s), ya que esta está ubicada en una zona urbana, donde el desprendimiento de cualquiera de sus elementos puede causar humanas o materiales.

3.3 Análisis de los métodos de unión seleccionados

La unión de los elementos que conforman la armadura que soportará el rotor del aerogenerador será mediante soldadura manual por arco eléctrico. Utilizando para esto el electrodo E-6013 se garantiza que las uniones soldadas soporten el peso del rotor y la fuerza generada por los vientos hasta 40 m/s (144 km/h).

Para fijar los álabes al tubo de polietileno se emplearán tornillos galvanizados de cabeza hexagonal de ½ x 2 ½ pulgadas. Además, la unión de la armadura al suelo y a la baranda

del edificio será mediante tornillos M-16 grado 4.6, con una longitud de 80 y 200 mm respectivamente. Se garantiza la resistencia a velocidades del viento hasta los 40 m/s (144 km/h) si se utilizan los tornillos mencionados anteriormente.

3.4 Análisis del acoplamiento entre rotores

Para convertir los módulos de 6 rotores en módulos de 12 rotores se utilizaron acoplamientos rígidos. Siempre que el espacio lo permita se instalarán módulos de 12 rotores sobre la azotea del edificio. Es importante para que estos funcionen correctamente construir pedestales de concreto debido a la irregularidad de la superficie de la azotea. Cuando esto sea imposible, pueden utilizarse acoplamientos flexibles.

3.5 Análisis del sistema de transmisión por correas

La transmisión por correas que se utilizará tiene una polea conductora de diámetro $D_1=280$ mm y una polea conducida de diámetro $D_2=233$ mm, la distancia entre centros de estas igual a 618,14 mm. Para lograr una mayor seguridad en la transmisión se emplearán dos correas trapezoidales B79, con una longitud de 2 043 mm. Con el objetivo de facilitar el montaje y desmontaje de la correa en caso de ser necesario existe la posibilidad de desplazar el generador 200 mm en sentido vertical. Se seleccionó la transmisión por correas ya que se caracterizan por producir poco ruido, y de esta forma se evita molestar a los habitantes del edificio donde estará ubicada la instalación.

3.6 Análisis del costo de la instalación

A continuación, se realizará el análisis del costo de un módulo de 6 rotores, el de un módulo de 12 rotores, y el costo del método de protección anticorrosiva.

3.6.1 Costo de un módulo de 6 rotores tipo AEROLIN con álabes toroidales para 3Kw de potencia.

| Componente | Cantidad | Costo en CUC | Costo en CUP |
|--|----------|--------------|--------------|
| Tubo de Aluminio 6061 $\varnothing_{EXT}140$ mm $\varnothing_{INT}120$ mm | 2,7 m | 40,00 | 12,00 |
| Perfil cuadrado de Al 6061 12 | 2,6 m | 5,00 | 1,50 |

| | | | |
|---|------------------------------|----------|----------|
| x 12 mm | | | |
| Laminado redondo Al 6061 Ø140 mm | 0,8 m | 10,00 | 3,00 |
| Laminado redondo Al 6061 Ø250 mm | 1,2 m | 15,00 | 4,50 |
| Tubo Polietileno PE 100 ØEXT 250 mm ØINT 225 mm | 2,6 m | 30,00 | 9,00 |
| Lámina de fibra de vidrio Tipo E de 300 gr/m ² en rollo de 37 kg/ 120 m ² | 1 Rollo | 450,00 | 135,00 |
| Cera desmoldante | 7,5 kg | 80,00 | 24,00 |
| Resina de Poliester H-834 | 10 kg | 100,00 | 100,00 |
| Película desmoldante | 6 kg | 98,00 | 29,40 |
| Catalizador K – 2000 | 5 kg | 100,00 | 100,00 |
| Rodamiento de contacto angular SKF 7216 BEP | 2 | 55,00 | 16,50 |
| Angular AC 100 x 100 x 8 mm | 2 m | 24,00 | 7,20 |
| Laminado plano de espesor 8 mm | 1 m ² | 12,50 | 3,75 |
| Tubo redondo AC ØEXT 68mm ØINT 60 mm | 10 m | 75,00 | 22,50 |
| Tubo rectangular de 50 x 70 x 4 mm | 1 m | 6,50 | 1,95 |
| Polea (Correa B) de dos canales de Ø280 mm | 1 | 22,00 | 6,60 |
| Polea (Correa B) de dos canales de Ø233 mm | 1 | 18,00 | 5,40 |
| Correa Trapezoidal B79 Longitud Efectiva 2 043 mm | 2 | 32,00 | 9,60 |
| Pedestales de concreto | 2 | 35,00 | 10,50 |
| Generador de CA trifásico del imán permanente NE- 3KPG de 3 kW | 1 | 630,00 | 189,00 |
| Componentes del sistema de funcionamiento eléctrico (Inversor, Convertidor, rectificador, transformador, | Según ofertas y necesidad | 3 800,00 | 1 140,00 |

| | | | |
|--|---------------------------|-----------|----------|
| etc. | | | |
| Tornillos, arandelas, varillas de soldar, cable eléctrico y otros insumos de fabricación | Según ofertas y necesidad | 1 100 | 330,00 |
| Total | | 6 738 ,00 | 2 151,80 |

La instalación posee un total de 3 módulos de 6 rotores, los que tendrían un costo total de 20 214 CUC más 6 455,40 CUP.

3.6.2 Costo de un módulo de 12 rotores tipo AEROLIN con álabes toroidales para 5kw de potencia.

| Componente | Cantidad | Costo en CUC | Costo en CUP |
|--|------------------|--------------|--------------|
| Tubo de Aluminio 6061 Ø _{EXT} 140 mm Ø _{INT} 120 mm | 5,4 m | 80,00 | 24,00 |
| Perfil cuadrado de Al 6061 de 12 x 12 mm | 5,2 m | 10,00 | 3,00 |
| Laminado redondo Al 6061 de Ø140 mm | 1,6 m | 20,00 | 6,00 |
| Laminado redondo Al 6061 de Ø250 mm | 2,4 m | 30,00 | 9,00 |
| Tubo Polietileno PE 100 de Ø _{EXT} 250 mm Ø _{INT} 225 mm | 5,2 m | 60,00 | 18,00 |
| Lámina de fibra de vidrio Tipo E de 300 gr/m ² en rollo de 37 kg/ 120m ² | 2 Rollos | 900,00 | 270,00 |
| Cera desmoldante | 15 kg | 160,00 | 48,00 |
| Resina de Poliester H-834 | 20 kg | 200,00 | 60,00 |
| Película desmoldante | 12 kg | 196,00 | 58,80 |
| Catalizador K - 2000 | 10 kg | 200,00 | 60,00 |
| Rodamiento de contacto angular SKF 7216 BEP | 4 | 110,00 | 33,00 |
| Angular AC 100 x 100 x 8 mm | 4 m | 48,00 | 14,40 |
| Laminado plano de espesor 8 mm | 2 m ² | 25,00 | 7,50 |

| | | | |
|---|---------------------------|----------|----------|
| Tubo redondo AC Ø _{EXT} 68 mm Ø _{INT} 60 mm | 20 m | 150,00 | 45,00 |
| Tubo rectangular de 50 x 70 x 4 mm | 2 m | 13,00 | 3,90 |
| Polea (Correa B) de dos canales de Ø280 mm | 1 | 22,00 | 6,60 |
| Polea (Correa B) de dos canales de Ø233 mm | 1 | 18,00 | 5,40 |
| Correa trapezoidal B79 de longitud primitiva 2 043 mm | 2 | 32,00 | 9,60 |
| Pedestales de concreto | 4 | 70,00 | 21,00 |
| Acoplamientos rígidos | 1 | 30,00 | 9,00 |
| Generador de CA trifásico del imán permanente modelo NE-5KPG de 5 kW | 1 | 1 350,00 | 405,00 |
| Componentes del sistema de funcionamiento eléctrico (Inversor, Convertidor, rectificador, transformador, etc. | Según ofertas y necesidad | 3 800,00 | 1 140,00 |
| Tornillos, arandelas, varillas de soldar, cable eléctrico y otros insumos de fabricación | Según ofertas y necesidad | 2 200 | 660,00 |
| Total | | 9 724 | 2 917,20 |

La instalación posee un total de 7 módulos de 12 rotores, los que tendrían un costo total de 68 068 CUC más 20 420,40 CUP.

3.6.3 Análisis del costo del método de protección anticorrosiva

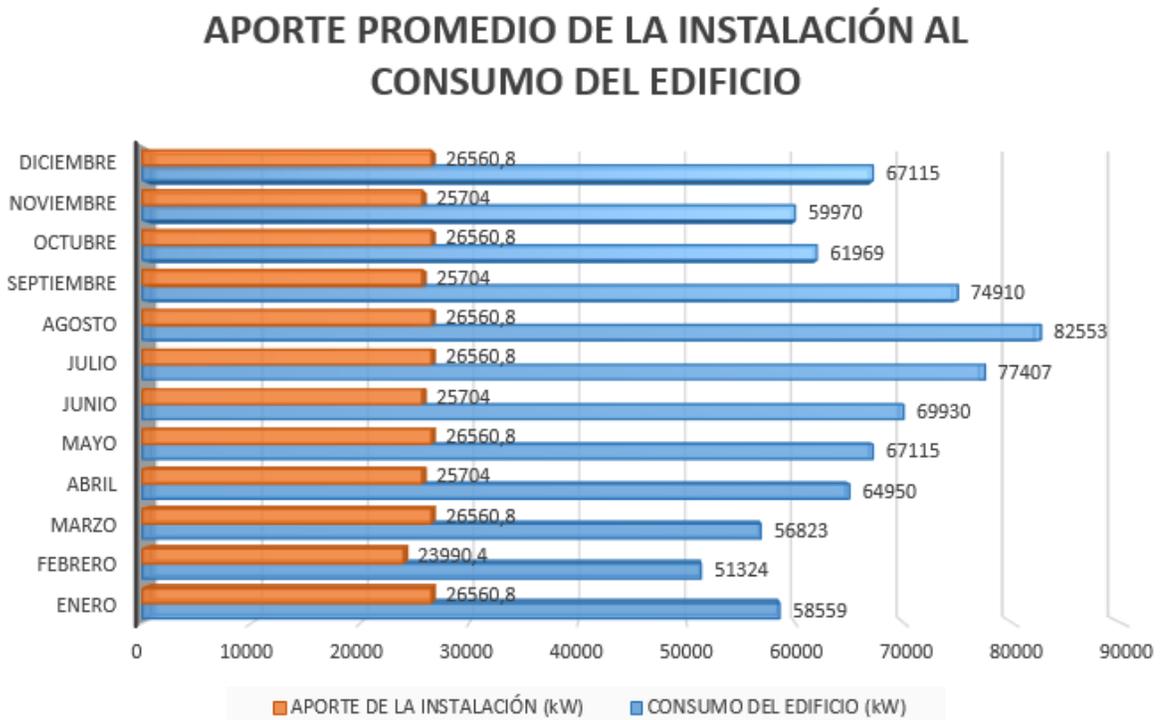
La pintura anticorrosiva Lanco que se utilizará tiene en valor de 8,50 CUC más 2,55 CUP por unidad. Como se dijo en el capítulo anterior serán necesarias 6 latas de esta pintura cubrir todas las superficies metálicas de la instalación, por lo que el costo total es 51 CUC más 15,30 CUP.

3.6.4 Costo total de la instalación

La instalación estará constituida por 3 módulos de 6 rotores y por 7 módulos de 12 rotores, con un costo total de 20 214 CUC más 6 455,40 CUP y 68 068 CUC más 20 420,40 CUP respectivamente. Si se suman estos valores y los 51 CUC más 15,30 CUP necesarios para la protección anticorrosiva, se obtiene que el valor total para la construcción y montaje de la instalación sobre la azotea del edificio 13 plantas- A es de 88 333 CUC más 26 891,10 CUP.

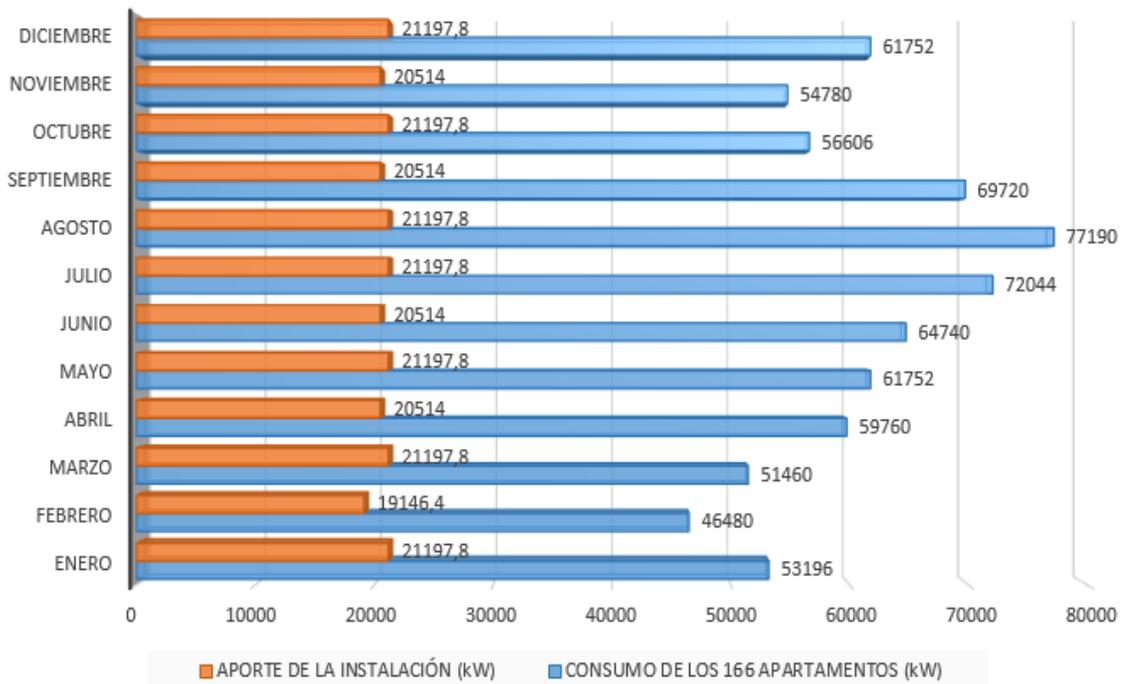
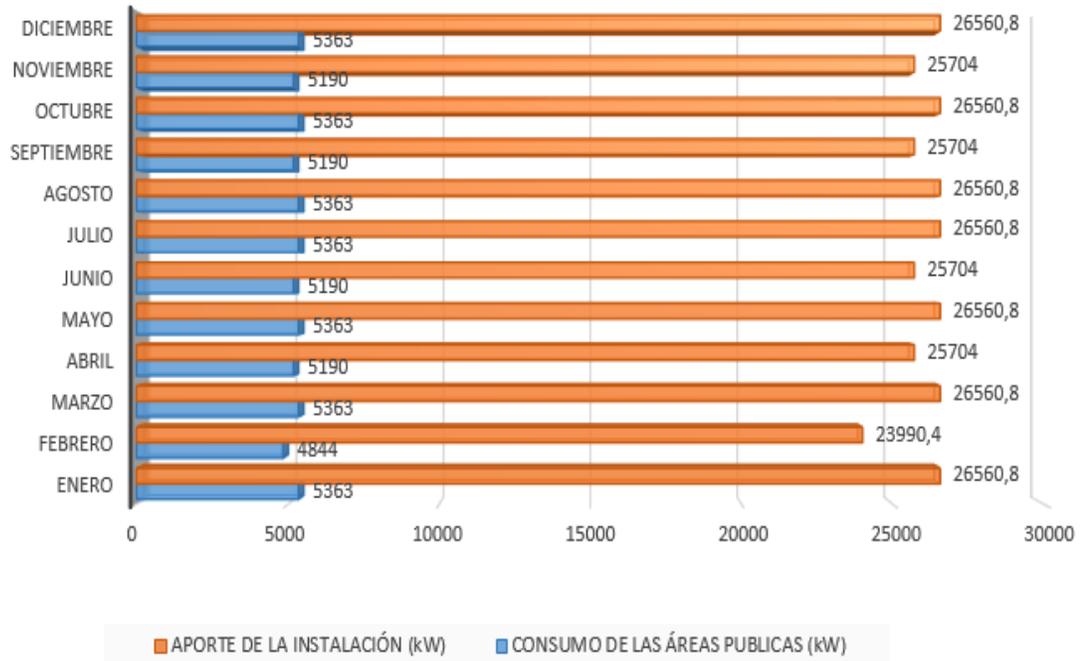
3.8 Análisis del aporte de la instalación a la red local del edificio

La instalación genera por horas 35,7 kW lo que serían diariamente 856,8 kW. Este aporte contribuirá a la disminución del consumo eléctrico del edificio 13 plantas- A. A continuación, se muestra mediante un gráfico lo que representa el aporte de la instalación al consumo eléctrico del edificio en cada mes del año.



El consumo total del edificio en el año es 792 625 kW, mientras que el aporte de la instalación en este mismo tiempo es de 312 732 kW; lo que representa un 39,46% de ahorro de electricidad en el año.

El aporte de la instalación puede cubrir el consumo de las áreas públicas y una parte del consumo de los 166 apartamentos, ya que representan un 7,97% y el 92,03% respectivamente del consumo total del edificio a lo largo del año. Estos análisis se muestran en los siguientes gráficos.



3.8.1 Ahorro de combustible

En cuanto al consumo de combustible se puede decir que los 35,7 kW que genera la instalación equivalen a un ahorro de combustible de 9,64 kg/h. En la siguiente tabla se muestra el ahorro de combustible mensual que se puede lograr con la instalación.



El ahorro de combustible al año será de 84 446,4 kg (84,45 Toneladas). Esto significaría para el país un ahorro de 45 843 CUC al año. Teniendo en cuenta esto y el costo total de la instalación, se puede afirmar que en aproximadamente seis meses se recupera la inversión realizada para la instalación de los aerogeneradores.

Conclusiones del Capítulo 3

- El aporte total de la instalación es de 312 732 kW al año, lo que significará un ahorro de 39,46 % del consumo total del edificio en este tiempo.
- La inversión necesaria para la instalación de los aerogeneradores sobre la azotea del edificio 13 plantas #1 es de 88 333 CUC más 26 891,10 CUP, la que será recuperada en 6 meses de aplicación.
- La instalación garantizará un ahorro de 84,45 Toneladas de combustible, lo que representa unos 45 843 CUC de ahorro al año.

CONCLUSIONES

1. Se determinaron los puntos de mayor potencial de viento sobre la azotea del edificio 13 plantas #1 a partir de las mediciones realizadas durante los meses de estudio, a partir de los cuales se estableció la geometría de la instalación, así como el diseño de la armadura que sostendrá el rotor del aerogenerador y la cantidad de módulos que se instalarán en función del espacio disponible.
2. Mediante cálculos se demostró que los perfiles tubulares (de dimensiones $\varnothing_{Ext}68\text{mm}$ $\varnothing_{Int}60\text{mm}$), de acero ASTM A570-85 Grado 30, que se emplearán en la construcción de la armadura van a resistir los esfuerzos generados por la velocidad del viento a 40 m/s (144 km/h) y el peso del rotor.
3. La unión de los elementos que conforman la armadura mediante soldadura manual por arco eléctrico utilizando electrodos E-6013 va a resistir los valores de esfuerzo que generados por velocidades del viento hasta 40 m/s (144 km/h); también se comprobó que los álabes fabricados con PRFV resistirán estas velocidades del viento sin desprenderse, siempre que la resistencia a esfuerzos cortantes de este material supere los 8,1 MPa.
4. Con la aplicación de la pintura anticorrosiva Lacon se garantiza la vida útil y protección de la instalación por un período de 5 años sin necesidad de mantenimiento.
5. Con la instalación constituida por 3 módulos de 6 rotores y 7 módulos de 12 rotores se disminuirán 312 732 kW del consumo del edificio, lo que representa un 39,46% del total; la inversión que se debe realizar es de 88 333 CUC más 26 891,10 CUP, la que será recuperada después de 6 meses de aplicación de la instalación.

RECOMENDACIONES

1. Continuar los estudios en los edificios altos de la ciudad de Matanzas donde puedan ser instalados los aerogeneradores de álabes toroidales.
2. Continuar con las acciones y gestiones con las direcciones del Partido y Consejos de administración del gobierno y la industria de la provincia para promover la instalación de aerogeneradores en lugares donde exista buen potencial del viento.

Referencias Bibliográficas

- BEER, F. P., JOHNSTON, E. R., EISENBERG, E. R. & SARUBBI, R. G. 1967. *Mecánica vectorial para ingenieros*, McGraw-Hill.
- BROTÓNS, P. U. 2010. *Construcción de estructuras metálicas*, Editorial Club Universitario.
- CASTILLO, R. 2016. El Aluminio: aspectos generales. *Tecnología del Aluminio*.
- CITMA. 2019. Energía Eólica. *renovable.cu*.
- CORVO, F., TORRENS, A., MARTÍN, Y., GONZÁLEZ, E., PÉREZ, J., VALDÉS, C., CASTAÑEDA, A. & PORTILLA, C. J. R. D. M. 2008. Corrosión atmosférica del acero en interiores. Sus particularidades en el clima tropical de Cuba. 44, 129-137.
- GARCÍA, S. A. 2018. *Estudio del potencial eólico en edificios altos de la ciudad de Matanzas*. Universidad de Matanzas.
- HEREDIA, R. B. & BURÓN, C. L. J. R. D. A. E. I. 2011. Es la Norma Cubana NC 285: 2003, pertinente para las Cargas de Viento que se desarrollan en la actualidad. 5.
- HIBBELER, R. C. 2004a. *Mecánica vectorial para ingenieros: dinámica*, Pearson Educación.
- HIBBELER, R. C. 2004b. *Mecánica vectorial para ingenieros: estática*, Pearson Educación.
- HIDALGO, D. B. J. C. A. 2015. Energía y desarrollo sostenible en Cuba. 42, 14-25.
- INDURA, S. 2005. Manual de soldadura. Industria y Comercio. Recuperado de: <http://www.indura.com.pe/doc/peru>
- LORA, M. A., TOCCI, C. A. & AVELLANEDA, A. S. 2019. Planta de polietileno de baja densidad.
- LUNA, V. C. 2009. Temas para la educación: Tipos de uniones. *Revista digital para profesionales de la enseñanza*.
- MANCHEÑO, M. & FERNÁNDEZ, C. 2012. *Manual de soldadura con electrodo revestido*, Editorial Paraninfo.
- MESA, C. E. T. L., TOLEDO, C. R. V., ALFONSO, M. J., GARCÍA, I. & GARCÍA, S. A. RE: *Título: Diseño de aerogeneradores para zonas urbanas*.

- MORIMITSU, D. T. 2015. *Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica
- MOTT, R. L. & SALAS, R. N. 1996. *Resistencia de materiales aplicada*.
- REYES, J. H. B. 2002. Los Plásticos Reforzados en Fibra de Vidrio (PRFV), sus aplicaciones y desarrollo en la Industria Nacional.
- REYES, L. B. 2010. *Caracterización de los Plásticos Reforzados con Fibra de Vidrio fabricados en Cuba*. UCLV: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- RINGEGNI, P. J. M. Y. E. D. M. T. E. D. D. A., UNLP 2013. Cálculo de uniones soldadas.
- ROCA, I. J. G., SEPTIEMBRE DE 2005. Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD).
- RODRÍGUEZ, R. J. V. 2019. *Diseño de instalación tipo conífera para múltiples mini aerogeneradores de álabes toroidales* Universidad de Matanzas.
- STRUCTURALIA. 2018. *Aerogeneradores de eje vertical y horizontal: tipos, ventajas e inconvenientes* [Online]. Available: www.blog.structuralia.com [Accessed].
- USECHE, L. V. 2009. Guía para el cálculo cinemático y diseño de transmisiones por correas, por cadenas y por ruedas dentadas. Pereira, Colombia.

Anexos

| ϕF | e | Sección A (cm) | Masa M (Kg/m) | Superficie U (m ² /m) | I_x (cm ⁴) | W_x (cm ³) | i_x (cm) |
|----------|-----|----------------|---------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| 60.2 | 1.5 | 2.757 | 2.171 | 0.188 | 11.815 | 3.934 | 2.070 |
| 60.2 | 2 | 3.644 | 2.871 | 0.188 | 15.3379 | 5.113 | 2.056 |
| 60.2 | 2.5 | 4.53 | 3.557 | 0.188 | 18.89 | 6.28 | 2.04 |
| 60.2 | 3 | 5.372 | 4.232 | 0.188 | 21.8742 | 7.291 | 2.018 |
| 60.2 | 3.5 | 6.23 | 4.894 | 0.188 | 25.15 | 8.36 | 2.01 |
| 60.2 | 4 | 7.06 | 5.544 | 0.188 | 28.02 | 9.31 | 1.99 |
| 68 | 1.5 | 3.134 | 2.460 | 0.214 | 17.323 | 5.095 | 2.352 |
| 68 | 2 | 4.146 | 3.255 | 0.214 | 22.295 | 6.646 | 2.335 |
| 68 | 2.5 | 5.144 | 4.038 | 0.214 | 27.621 | 8.124 | 2.310 |
| 68 | 3 | 6.126 | 4.809 | 0.214 | 32.417 | 9.534 | 2.301 |
| 68 | 3.5 | 7.09 | 5.567 | 0.214 | 36.99 | 10.88 | 2.28 |
| 68 | 4 | 8.04 | 6.313 | 0.214 | 41.34 | 12.16 | 2.27 |
| 76 | 1.5 | 3.51 | 2.76 | 0.24 | 24.37 | 6.41 | 2.63 |
| 76 | 2 | 4.649 | 3.649 | 0.239 | 31.8454 | 83.80 | 2.617 |
| 76 | 2.5 | 5.773 | 4.532 | 0.239 | 39.0288 | 10.271 | 2.600 |
| 76 | 3 | 6.880 | 5.401 | 0.239 | 45.9063 | 12.081 | 2.584 |
| 76 | 3.5 | 7.97 | 6.258 | 0.24 | 52.50 | 13.82 | 2.570 |
| 76 | 4 | 9.05 | 7.10 | 0.24 | 58.81 | 15.48 | 2.550 |
| 80 | 2 | 4.901 | 3.847 | 0.251 | 37.2963 | 9.324 | 2.758 |
| 80 | 2.5 | 6.087 | 4.778 | 0.251 | 45.7467 | 11.437 | 2.742 |
| 80 | 3 | 7.257 | 5.697 | 0.251 | 53.8648 | 13.466 | 2.725 |
| 80 | 3.5 | 8.41 | 6.603 | 0.251 | 61.66 | 15.42 | 2.71 |
| 80 | 4 | 9.55 | 7.4971 | 0.251 | 69.15 | 17.29 | 2.69 |

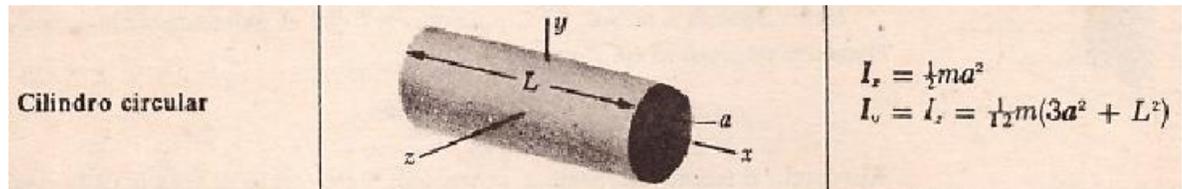
Anexo 1. Tabla de datos de los tubos fabricados por la empresa METUNA.

| Modelo | Ingecori/Wind 2,5 | Ingecori/Wind 3,3 | Ingecori/Wind 5 |
|--|---|-------------------|-----------------|
| Valores de Entrada (DC) | | | |
| Rango de tensión del generador para pot. nominal | 160 - 450 V | 155 - 450 V | 160 - 450 V |
| Tensión máxima DC ¹⁾ | 550 V | 550 V | 550 V |
| Corriente máxima DC | 16 A | 22 A | 33 A |
| Valores de Salida (AC) | | | |
| Potencia nominal AC modo HT ²⁾ | 2,5 kW | 3,3 kW | 5 kW |
| Potencia nominal AC modo HP ³⁾ | 2,7 kW | 3,7 kW | 5,5 kW |
| Corriente máxima AC | 12 A | 16 A | 22 A |
| Tensión nominal AC | 230 V | 230 V | 230 V |
| Frecuencia nominal AC | 50 Hz | 50 Hz | 50 Hz |
| Coseno Φ ⁴⁾ | 1 | 1 | 1 |
| THD ⁵⁾ | 3% | 3% | 3% |
| Rendimiento | | | |
| Eficiencia máxima | 94,7% | 95% | 95,1% |
| Euroeficiencia | 93,8% | 94% | 94,3% |
| Datos Generales | | | |
| Consumo en standby | <10 W | <10 W | <10 W |
| Temperatura de funcionamiento | -20°C a +70°C | -20°C a +70°C | -20°C a +70°C |
| Humedad relativa | 0 - 95% | 0 - 95% | 0 - 95% |
| Grado de protección | IP65 | IP65 | IP65 |
| Referencias normativas | EN 50178, VDE0126-1-1, GB371, CEI 11-20, CEI 11-20 V1, CEI 0-16, RD 661/2007, RTC ale rete BT di Enel Distribuzione, Marcado CE | | |

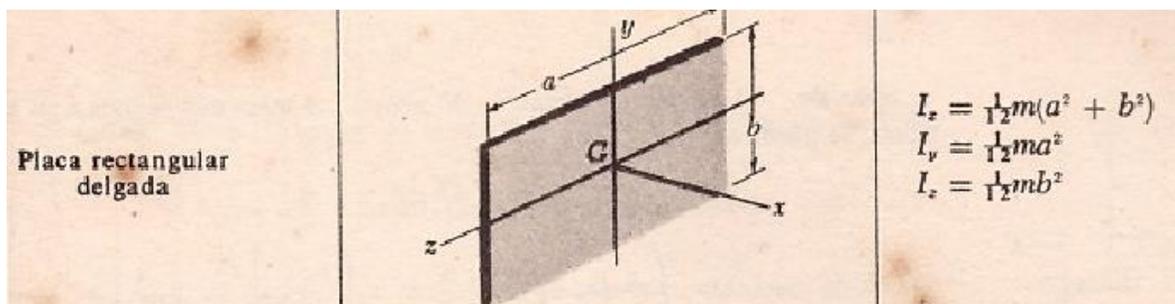
Anexo 2. Características técnicas del inversor Ingecon® Wind.



Anexo 3. Chapa técnica del motor del elevador.



Anexo 4. Momento de inercia de un cilindro circular.



Anexo 5. Momento de inercia de una placa rectangular cuadrada

PLANCHA TIPO AVP - P2

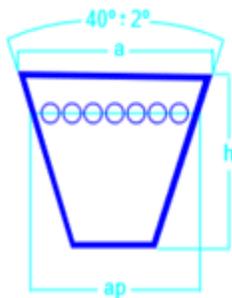


AVP - P2
14 mm.

CARACTERÍSTICAS

Espesor: 14 mm.
 Carga nominal: 8 Kg/cm²
 Carga de trabajo: de 3 a 50 Kg/cm²
 Módulo elástico: 7000 kg/cm²
 Temperatura: -30°C a +120°C
 Dureza: 90 IRHD aprox.
 Coef. de rozamiento:
 - Acero: 0,7
 - Madera: 0,75
 - Hormigón: 0,8
 Amortiguación: 16%.

Anexo 6. Características de la goma anti vibratoria



- a Ancho base superior.
- h Altura o espesor.
- ap Ancho primitivo.

| Sección | a mm | h mm | ap mm |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| Z | 10 | 6 | 8.5 |
| A | 13 | 8 | 11 |
| B | 17 | 11 | 14 |
| C | 22 | 14 | 19 |
| D | 32 | 19 | 27 |
| E | 38 | 25 | 32 |

Anexo 7. Geometría de la correa trapezoidal perfil B

| Correa (in) | Sección Z (mm) | Sección A (mm) | Sección B (mm) | Sección C (mm) | Sección D (mm) | Sección E (mm) |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 41 | 1066 | 1075 | 1086 | - | - | - |
| 42 | 1092 | 1106 | 1100 | - | - | - |
| 43 | 1117 | 1134 | 1140 | - | - | - |
| 44 | 1143 | 1153 | 1156 | 1191 | - | - |
| 45 | 1168 | 1186 | 1184 | 1217 | - | - |
| 46 | 1193 | 1199 | 1204 | 1242 | - | - |
| 47 | 1219 | 1232 | 1237 | 1267 | - | - |
| 48 | 1244 | 1262 | 1268 | 1293 | - | - |
| 49 | 1270 | 1280 | 1288 | 1318 | - | - |
| 50 | 1295 | 1306 | 1318 | 1344 | - | - |
| 51 | 1320 | 1330 | 1328 | 1357 | - | - |
| 52 | 1346 | 1354 | 1367 | 1394 | - | - |
| 53 | 1371 | 1381 | 1392 | 1429 | - | - |
| 54 | 1397 | 1405 | 1410 | 1442 | - | - |
| 55 | 1422 | 1429 | 1443 | 1460 | - | - |
| 56 | 1447 | 1459 | 1460 | 1497 | - | - |
| 57 | 1473 | 1492 | 1491 | 1527 | - | - |
| 58 | 1498 | 1507 | 1512 | 1550 | - | - |
| 59 | 1524 | 1532 | 1541 | 1576 | - | - |
| 60 | 1549 | 1556 | 1556 | 1598 | - | - |
| 61 | - | 1584 | 1601 | 1623 | - | - |
| 62 | - | 1605 | 1626 | 1648 | - | - |
| 63 | - | 1633 | 1641 | 1674 | - | - |
| 64 | - | 1658 | 1674 | 1699 | - | - |
| 65 | - | 1683 | 1695 | 1725 | - | - |
| 66 | - | 1714 | 1724 | 1745 | - | - |
| 67 | - | 1742 | 1743 | 1775 | - | - |
| 68 | - | 1767 | 1770 | 1788 | - | - |
| 69 | - | 1785 | 1794 | 1826 | - | - |
| 70 | - | 1813 | 1818 | 1847 | - | - |
| 71 | - | 1841 | 1846 | 1877 | - | - |
| 72 | - | 1862 | 1878 | 1897 | - | - |
| 73 | - | 1887 | 1900 | 1928 | - | - |
| 74 | - | 1913 | 1924 | 1953 | - | - |
| 75 | - | 1937 | 1947 | 1979 | - | - |
| 76 | - | 1963 | 1973 | 1989 | - | - |
| 77 | - | 1989 | 1999 | 2015 | - | - |
| 78 | - | 2013 | 2014 | 2042 | - | - |
| 79 | - | 2033 | 2043 | 2068 | - | - |
| 80 | - | 2065 | 2075 | 2094 | - | - |
| 81 | - | 2093 | 2103 | 2119 | - | - |
| 82 | - | 2116 | 2126 | 2145 | - | - |
| 83 | - | 2133 | 2151 | 2170 | - | - |
| 84 | - | 2167 | 2177 | 2196 | - | - |
| 85 | - | 2193 | 2203 | 2221 | - | - |
| 86 | - | 2220 | 2230 | 2247 | - | - |
| 87 | - | 2245 | 2258 | 2273 | - | - |

Anexo 8. Tabla de normalización de la longitud de la correa trapezoidal, según Dumlop

S. A