



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



PROYECTO FIN DE CARRERA

AEROGENERADOR DE BAJO COSTE EN BANGLADESH

Presentado por

DAVID FERNANDO SANJUAN

Dirigido por

JOSÉ LUIS NUÑEZ BRUIS

Ingeniería Industrial. Departamento de Ingeniería Mecánica.

ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Zaragoza, Junio de 2012

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento al Director de este proyecto, Don José Luis Nuñez Bruis, que sin sus consejos y anotaciones este proyecto no podría haber sido realizado. Su ayuda ha sido de vital importancia para la realización de este proyecto y siempre le estaré eternamente agradecido por todo lo que ha hecho por mí.

Agradecer también a todos los profesionales que me han ayudado en la ejecución del proyecto, tanto en la Universidad de Zaragoza, en la Universidad de Linköping y en ITA. Y en especial agradecer a Don José Sánchez Cid por su colaboración.

Por último, quiero agradecer a mis amigos, compañeros de carrera y familiares por su apoyo durante todos estos años de estudio y dedicación.

ZARAGOZA, Julio de 2012

David Fernando Sanjuan

RESUMEN

Este proyecto fin de carrera se ha realizado dentro del Departamento de Diseño de Máquinas de la Universidad de Linköping. Bangladesh es un país superpoblado localizado en el sur este asiático. Gran parte de la población vive en pequeños poblados aislados en zonas rurales, donde no tienen acceso a la red eléctrica local, la intención del proyecto es proporcionar energía eléctrica a estos poblados a través de la carga de baterías. Para ello se diseña un aerogenerador de bajo coste capaz de satisfacer la demanda local.

Se abarcan distintos ámbitos y áreas de la ingeniería en la ejecución del proyecto. En primer lugar se trata la conversión energética, como conseguir energía eléctrica a partir del viento. Tras realizar un estudio acerca de las condiciones climáticas de lugar y las necesidades eléctricas de la zona, es necesario elegir el tipo de aerogenerador que mejor se adapte a estas necesidades, eligiéndolo siempre desde el punto de vista económico. Otro de los ámbitos a tratar es el diseño y calculo de estructuras, una vez elegido el aerogenerador se debe alzar hasta cierta altura para lo que se diseña una estructura capaz de hacer frente a las posibles situaciones adversas del lugar, en la que se utilizan materiales locales. El diseño de maquinas tiene un papel importante en el proyecto ya que se deben de diseñar diferentes componentes y ensamblajes que unan la estructura y el aerogenerador, además de componentes que ayuden a la instalación a funcionar correctamente y aumentar su rendimiento. Por último se trata la distribución eléctrica. Se decide cual va a ser la forma en la que la energía eléctrica llegará a los diferentes hogares, pensándolo siempre desde el ahorro económico.

Índice general

1. Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Descripción del proyecto.....	2
2. Aerogeneración.....	5
2.1. Principios físicos de la conversión de energía eólica.....	5
2.1.1. Potencia captada por resistencia.....	8
2.1.2. Potencia captada por sustentación.....	9
2.2. Tipos de aerogeneradores.....	11
2.2.1. Rotores de eje vertical.....	11
2.2.2. Rotores de eje horizontal.....	12
3. Turbomáquina.....	15
3.1. Introducción.....	15
3.2. El viento en Bangladesh.....	15
3.3. Demanda eléctrica.....	17
3.4. Tobera.....	18
3.5. Elección de la turbomáquina.....	20
3.6. Elementos auxiliares.....	25
3.6.1. Eje central.....	25
3.6.2. Poste superior.....	26
3.6.3. Conjunto tobera.....	27
3.6.4. Conjunto veleta.....	28
4. Estructura.....	29
4.1. Introducción.....	29
4.2. Torre.....	29
4.2.1. Bambú.....	30
4.2.2. Estructuras verticales.....	32
4.2.3. Método de análisis.....	32
4.2.4. Diferentes configuraciones de bambú.....	33
4.2.5. Configuración final.....	36
4.3. Unión superior.....	37
5. Distribución eléctrica.....	39
5.1. Esquema general.....	39

5.2.	Generador eléctrico.....	40
5.3.	Regulador de baterías.....	40
5.4.	Batería.....	41
5.4.1.	Funcionamiento.....	41
5.4.2.	Tipos de baterías de media y alta capacidad.....	42
5.4.3.	Elección de la batería.....	45
5.5.	Cargas de protección.....	45
5.6.	Inversor.....	46
6.	Conclusiones y líneas futuras.....	47
6.1.	Conclusiones relativas al diseño y dimensionado del aerogenerador....	47
6.2.	Líneas futuras.....	48
6.3.	Conclusiones personales.....	49
A.	Diferentes aerogeneradores comerciales.....	51
A.1.	Introducción.....	51
A.2.	Stealthgen D400 Wind Turbine.....	52
A.3.	YWS-500 Wind Luce Wind Turbine.....	53
A.4.	Australia 600W Wind Turbine.....	54
A.5.	Ampair 600 Wind Turbine.....	55
A.6.	Windsave WS1200 Wind Turbine.....	56
A.7.	Honeywell WT6500 Wind Turbine.....	57
A.8.	Air Dolphin 1KW Wind Turbine.....	58
A.9.	FuturEnergy 1KW Wind Turbine.....	59
A.10.	WINDCore 1500.....	60
A.11.	Samrey Mistral Wind Turbine.....	61
A.12.	Aerodyne Lakota Wind Turbine.....	62
A.13.	Whisper 100 Wind Turbine.....	63
A.14.	Antaris 1.7KW Wind Turbine.....	64
B.	Dimensionado ensamblaje superior.....	65
B.1.	Dimensionado viga soporte de tobera.....	65
B.2.	Dimensionado viga soporte de veleta.....	67
C.	Análisis de flujo en la tobera.....	71
C.1.	Análisis de flujo.....	71
C.2.	Distribución en coordenada.....	72
C.3.	Resultados.....	73
D.	Análisis de la torre.....	75
D.1.	Análisis estructural.....	75
D.2.	Análisis de material.....	81
E.	Análisis unión superior.....	83
E.1.	Análisis estructural de los brazos.....	83
E.2.	Análisis estructural de las cañas de bambú.....	84
F.	Elección del rodamiento.....	87

F.1. Elección del rodamiento.....	87
Referencias.....	89

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Este proyecto fin de carrera se basa en el diseño y dimensionado de un aerogenerador de bajo coste para su posible instalación en zonas rurales de Bangladesh, las cuales no tienen acceso a la red eléctrica del país, y que será una de las principales fuentes de suministro de energía eléctrica. Está pensado para carga baterías, las cuales se usarán posteriormente.

La República Popular de Bangladesh es un país ubicado en el sur de Asia. Su territorio está prácticamente rodeado por la India y el resto de la frontera limita con Birmania. La zona está sujeta anualmente a ciclones y monzones dada su situación geográfica. Además Bangladesh es el octavo país más poblado del mundo con casi 170 millones de habitantes, destacando su elevada densidad de población, gran parte de la cual vive en zonas rurales.

El emplazamiento en el que se pretende llevar a cabo este proyecto comprende zonas rurales con escasos recursos económicos. Por ello se deben tener en cuenta materiales de construcción alternativos a los usados en Europa, materiales locales. El principal material de construcción local, el bambú, va a ser fundamental en el proyecto. Este tipo de aerogenerador puede plantearse en el escenario de ayuda temporal, como suministro eléctrico en zonas arrasadas por desastres naturales, por poner un ejemplo.

Bangladesh se caracteriza por tener un viento débil, la velocidad promedio del viento es de 4 km/h, por lo que es necesario alcanzar una cierta altura para encontrar un viento mayor. A vista de estos datos se pretende diseñar un aerogenerador muy ligero, que funcione a bajas velocidades.

1.2. Objetivos

Se pretende encontrar un aerogenerador comercial y adaptarlo al entorno en las mejores condiciones posibles, por ello será necesario el diseño de ensamblajes adicionales para dicha consecución, por lo que se realizará un estudio de los diferentes aerogeneradores comerciales disponibles para encontrar el más adecuado a esta instalación.

Debido a la escasa velocidad del viento, será necesario realizar un estudio acerca de la distribución de velocidades de este, y en función de ello decidir una altura a la cual situar el aerogenerador. Se diseñaran diversas torres y se elegirá la más adecuada y también es objetivo de este proyecto diseñar un ensamblaje que sea capaz de unir la torre con el aerogenerador.

Por último, se expondrá brevemente el sistema de distribución eléctrico, haciendo hincapié en las baterías a utilizar donde se realizará un estudio de mercado en cuanto a baterías de media y alta capacidad y se seleccionará la más adecuada.

Por el contrario no es objeto del proyecto diseñar un aerogenerador propio, es decir, el proyecto se limita a encontrar uno en el mercado que cumpla las expectativas. Así como tampoco es objetivo diseñar explícitamente cada componente y dar medidas detalladas de los mismos. Tampoco se detallará el proceso de construcción de la estructura.

El diseño de la cimentación de la torre no es un objetivo puesto que desconocemos las características de la mayoría de los terrenos donde se podría implementar esta instalación, así como dicho terreno variaría entre los diferentes casos, por lo que no se da el diseño de una ya que solo sería adecuada para un caso específico.

El esquema eléctrico de la instalación no será íntegramente detallado, ya que los diferentes aerogeneradores comerciales proporcionan un sistema de carga de baterías, por lo que el proyecto se limita a dar una idea general acerca del sistema de distribución.

1.3. Descripción del proyecto

El proyecto se divide en varios capítulos acompañados de seis apéndices en los que se detallan cálculos precisos de la instalación.

En el segundo capítulo se realiza un estudio teórico acerca de los principios de la conversión eólica, basándonos en los fundamentos físicos, y distinguiendo entre las

diferentes formas de conversión, así como la comparativa de los distintos conceptos de aerogeneración.

El tercer capítulo comienza realizando un estudio del viento en la zona, así como un estudio de la demanda eléctrica local. A partir de ello, y teniendo en cuenta los inputs y outputs de la instalación, se elige el tipo de aerogeneración mas adecuada, el aerogenerador comercial a usar, y dadas las bajas condiciones climatológicas y con el motivo de mejorar la eficiencia de la instalación, se diseña una tobera y se diseña todo el ensamblaje superior.

El cuarto capítulo desarrolla la estructura. Para ello en primera instancia se estudian las diferentes formas de construcción locales, se analizan los posibles materiales utilizados así como se investigan sus propiedades. Son propuestas diferentes configuraciones y finalmente se elegirá la configuración que proporcione los mejores resultados y reduzca el coste. Además se diseña el ensamblaje que une la torre con el aerogenerador y que transmite las fuerzas ejercidas en la parte superior a la torre de manera competente.

En el quinto capítulo se elige el sistema de distribución eléctrica de la instalación, dando una breve explicación de su funcionamiento y sus componentes y profundizando en la batería, para ello se explica en primer lugar el funcionamiento y posteriormente se realiza un estudio del arte al respecto de las diferentes baterías de media y alta capacidad disponibles en el mercado.

Por último, se ofrece una conclusión del proyecto y una mención a las posibles líneas futuras del mismo.

En la figura 1.1 se observan las principales partes del proyecto.

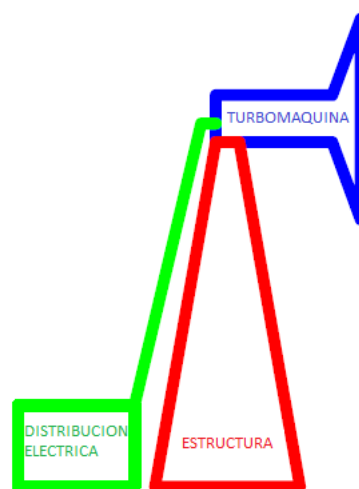


Figura 1.1: Distribución general del proyecto

Capítulo 2

Aerogeneración

2.1. Principios físicos de la conversión de energía eólica

El objetivo de la conversión eólica es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Pero la conversión de esta energía eólica tiene sus propias reglas físicas, donde la ley fundamental es la Teoría Elemental del Momento de Betz. Esta ley expone que la máxima energía que puede sacarse del viento es $\frac{16}{27}$ de la energía cinética del viento. A continuación se desarrolla esta teoría.

La energía cinética del viento viene dada por la siguiente expresión, donde m es la masa y v la velocidad del viento:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

Donde el flujo másico del viento se expresa como, siendo ρ la densidad, y A el área:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (2)$$

Y la potencia del viento:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (3)$$

A este punto, la cuestión es saber cuánta energía mecánica podemos extraer, siguiendo el esquema propuesto por la figura 2.1.

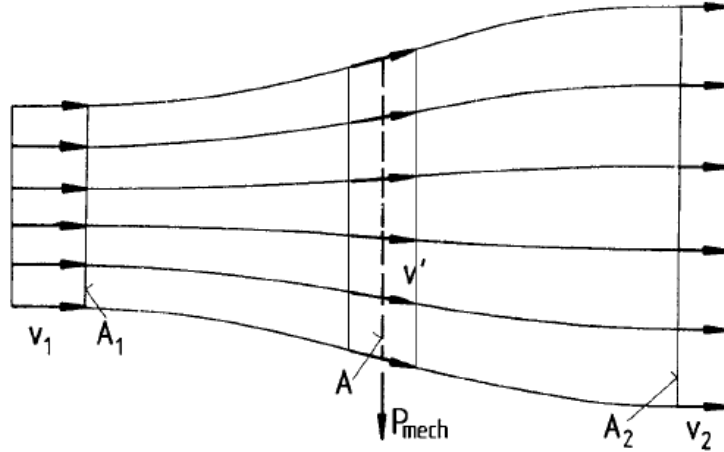


Figura 2.1: Evolución de un flujo de viento a su paso por el aerogenerador [1]

El flujo de viento a su paso por el aerogenerador reduce su velocidad, que hace aumentar su área, como se deduce de la ecuación de continuidad, la cual hace mantener el flujo de aire constante, donde A_1 y v_1 son el área y la velocidad del flujo antes de su paso por el aerogenerador y A_2 y v_2 el área y la velocidad del flujo una vez ha dejado atrás el aerogenerador.

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

La potencia mecánica que puede convertir el aerogenerador corresponde a la diferencia de potencia antes y después del paso del flujo de viento a través de las palas del aerogenerador:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^3 \cdot A_1 - \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^3 \cdot A_2 \quad (5)$$

Donde reorganizando ayudándonos de la ecuación de continuidad se obtiene:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1 \cdot A_1 (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (6)$$

La máxima potencia extraída se daría cuando la velocidad tras las palas fuese cero, lo cual no tendría sentido físico, por lo que es necesario encontrar el ratio v_2/v_1 que permita obtener la máxima potencia.

Se requiere una ecuación mas, la ley de conservación del momento, es decir la fuerza que ejerce el viento:

$$F = \dot{m} (v_1 - v_2) \quad (7)$$

Por lo que la potencia:

$$P = \dot{m} (v_1 - v_2) \cdot v' \quad (8)$$

Siendo v' la velocidad del viento a su paso a través de las palas. Igualando las dos expresiones de la potencia, se obtiene la siguiente relación de velocidades:

$$\dot{m}(v_1 - v_2) = \dot{m}(v_1 - v_2) \cdot v' \quad (9)$$

$$v' = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (m/s) \quad (10)$$

Donde ahora el flujo másico es:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v' = \frac{1}{2} \rho \cdot A(v_1 + v_2) \quad (11)$$

Y la potencia extraída del viento:

$$P = \frac{1}{4} \rho \cdot A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (12)$$

Considerando la potencia máxima del viento:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^3 \cdot A \quad (13)$$

Se puede definir un ratio entre ellos, la relación entre la potencia mecánica extraída y la potencia máxima del aire, el coeficiente de potencia, C_p [1].

$$C_p = \frac{P}{P_o} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (14)$$

Donde el máximo coeficiente de potencia se da para el ratio $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$, el cual proporciona el siguiente coeficiente de potencia, también llamado Límite de Betz en honor al científico que desarrollo esta teoría:

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (15)$$

En la figura 2.2 se muestra la evolución del coeficiente de potencia para los diferentes ratios de velocidades.

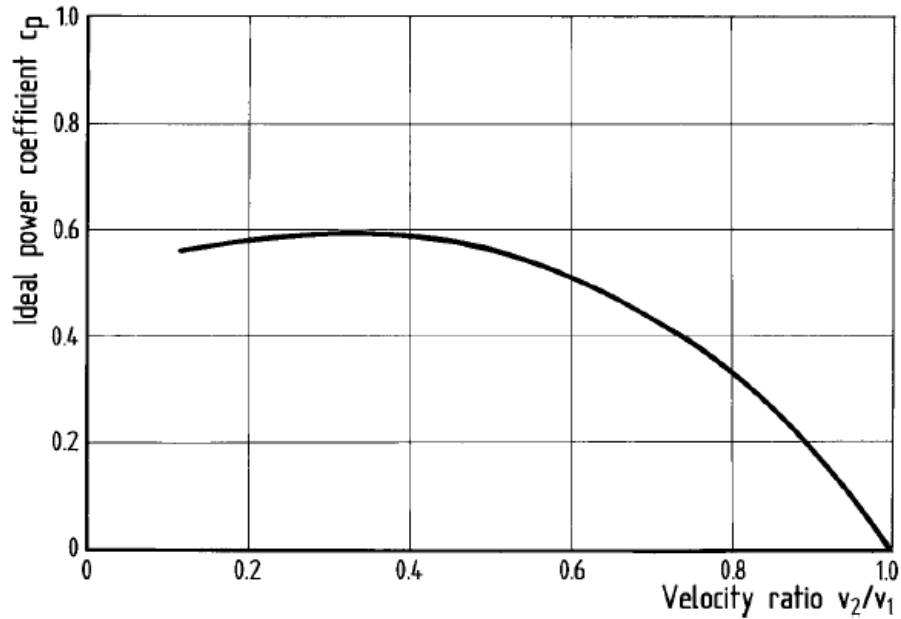


Figura 2.2: Evolución del coeficiente de potencia [1]

2.1.1. Potencia captada por resistencia

En este tipo de generación la potencia se debe al arrastre que ejerce el viento sobre una superficie. Como se aprecia en la figura 2.3 el viento incide sobre la semiesfera y hace que la semiesfera experimente una fuerza de arrastre D , y se desplace con velocidad v .

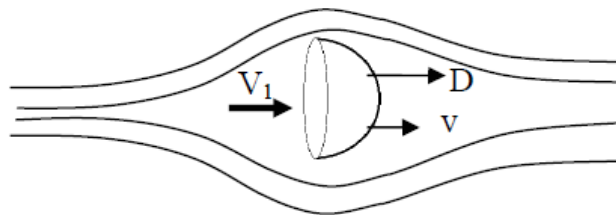


Figura 2.3: Semiesfera arrastrada por el viento

El arrastre se expresa como:

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot A \quad (16)$$

Donde la velocidad relativa, $V_r = (V_1 - v)$, siendo V_1 la velocidad del viento y v la velocidad con la que se mueve el cuerpo arrastrado, A el área proyectada por el cuerpo y C_D el coeficiente de resistencia. Así que la potencia obtenida se expresa como:

$$P_C = D \cdot v = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot A \cdot v \quad (17)$$

Por lo que el coeficiente de potencia:

$$C_P = \frac{P_C}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A} = C_D \cdot \left(1 - \frac{v}{v_1}\right)^2 \cdot \frac{v}{v_1} \quad \text{con} \quad \frac{v}{v_1} = x \quad (18)$$

Derivando respecto a x e igualando a cero para obtener el máximo coeficiente de potencia, el cual se da en $x = \frac{1}{3}$, y teniendo en cuenta que el coeficiente de resistencia máximo que se puede obtener, C_D , el cual es entorno a 1.3 el coeficiente de potencia máximo será:

$$C_{P,max} = C_D \cdot \frac{4}{27} = 1.3 \cdot \frac{4}{27} \cong 0.193 \quad (19)$$

Este valor de coeficiente de potencia máximo está muy por debajo del límite de Betz, por eso no se utilizan aerogeneradores de este tipo.

2.1.2. Potencia captada por sustentación

Para considerar la potencia captada por sustentación se toma una sección de pala, donde la fuerza que hace girar la pala es:

$$F = L \cdot \sin\phi - D \cdot \cos\phi \quad (20)$$

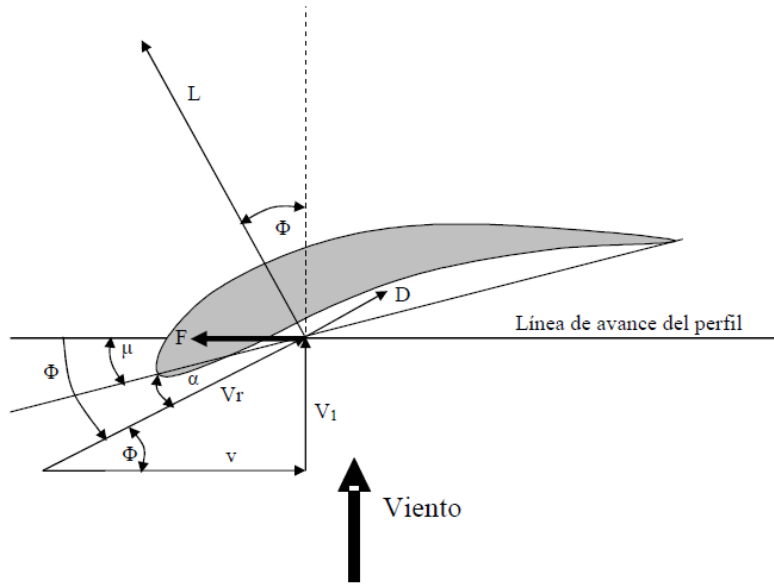


Figura 2.4: Fuerzas y velocidades sobre la pala

En la figura 2.4 se aprecian las fuerzas que aparecen en la pala, así como las velocidades. Donde L es la fuerza de sustentación (lift), D la fuerza de arrastre (drag), y ϕ el ángulo de la velocidad relativa:

$$\sin\phi = \frac{v_1}{v_r} \quad (21)$$

$$\cos\phi = \frac{v}{v_r} \quad (22)$$

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot A \quad (23)$$

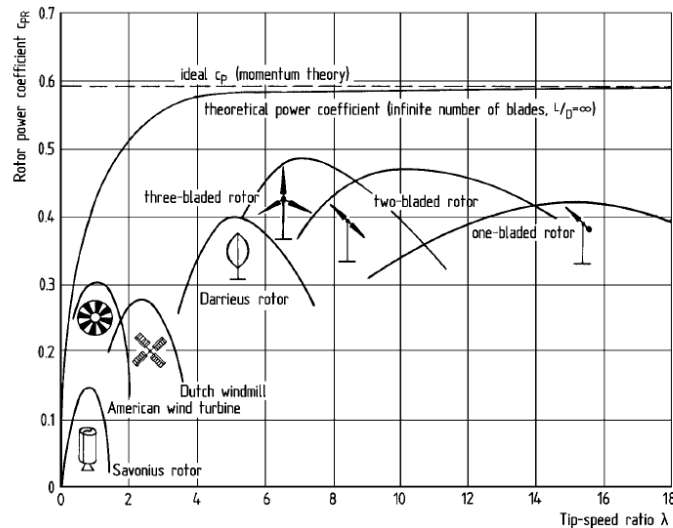
$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot A \quad (24)$$

La potencia captada será $P_C = F \cdot v$, con $\frac{v}{v_1} = x$ el coeficiente de potencia será:

$$C_P = C_D \cdot \sqrt{1 + x^2} \cdot \left(\frac{C_L}{C_D} - x \right) \cdot x \quad (25)$$

En este caso el coeficiente de potencia varía con x , es decir con las velocidades, pero también depende de α , ángulo de ataque, y de C_L (coeficiente de sustentación) y C_D , por lo que para obtener la variación del coeficiente de potencia en función de un parámetro, hay que fijar otros. Este tipo de aerogeneradores proporcionan un coeficiente de potencia más alto, y por ello son los usados en la actualidad [2].

Por último es muy común expresar el coeficiente de potencia de un aerogenerador en función de su tip-speed ratio, λ , donde $\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_1}$, siendo ω la velocidad angular del aerogenerador y R el radio de las palas, como se muestra en la figura 2.5.

Figura 2.5: Grafica C_p - λ [1]

2.2. Tipos de aerogeneradores

Hay muchas formas de convertir la energía cinética del aire en trabajo mecánico, la clasificación más utilizada es según la dirección del eje del rotor (horizontal y vertical), aunque también se pueden clasificar según su función aerodinámica (resistencia y sustentación). Las diferencias entre resistencia y sustentación han sido mostradas antes, mientras que ahora se comparan los rotores verticales y horizontales.

2.2.1. Rotores eje vertical

Se caracterizan porque el eje de rotación del rotor es vertical, y son los más antiguos. Distinguimos actualmente 3 tipos diferentes, cada uno se basa en un principio distinto, los cuales están representados en la figura 2.6.

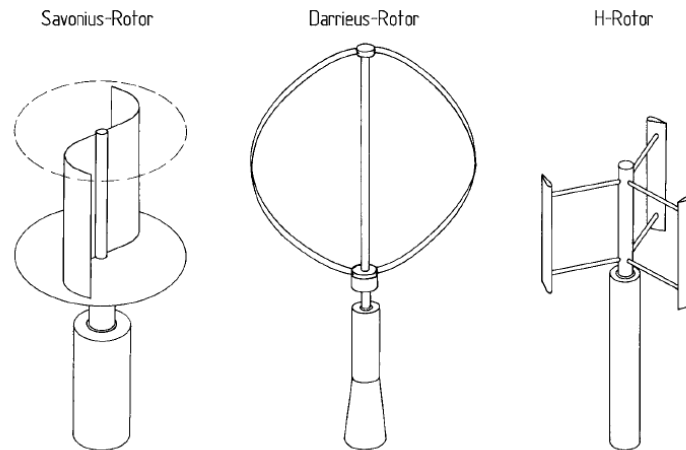


Fig 2.6: Diferentes conceptos de aerogeneradores con eje vertical [1]

Cada uno de ellos trabaja de manera distinta. El rotor Savonius capta potencia a través de la resistencia generada por sus palas, este concepto fue el más antiguo.

Con el tiempo, se desarrollaron otro tipo de rotores de eje vertical, como el rotor Darrieus, donde las palas giran sobre su eje de revolución, este tipo de rotores son más eficientes ya que trabajan por sustentación.

Por último los rotores H, los cuales también trabajan por sustentación, poseen la ventaja de poder variar el ángulo de ataque de sus palas, con lo que controlan la velocidad de giro, ventaja que no poseen los rotores anteriores.

Las ventajas de este tipo de aerogeneradores son:

- Diseño simple
- No es necesario orientarlos

Mientras que sus inconvenientes:

- Poseen un bajo tip-speed ratio, es decir una baja velocidad de rotación
- No se puede controlar la velocidad de rotación mediante la variación del ángulo de ataque (excepto en el rotor H)

2.2.2. Rotores eje horizontal

Se caracterizan porque el eje de rotación del rotor es horizontal, aunque difieren entre ellos en muchos aspectos como el número de palas. Este aspecto es fundamental en el diseño del aerogenerador, ya que un mayor número de palas proporcionará un momento mayor en el eje, y menor velocidad de rotación, lo que favorecerá que el rotor arranque antes y sean buenos en el caso de necesitar trabajo mecánico, como es el caso de los rotores multipala americanos, diseñados para bombear agua [1].

Por el contrario, en la generación eléctrica se usan diseños con menos palas para que la velocidad de rotación sea mayor. Distinguimos entre hélices de una, dos y tres palas:

- Hélice una pala: este tipo de hélice requiere un contrapeso que compense la pala, son mas económicas, pero hay dificultades debido a las vibraciones, por lo que no son muy utilizadas.
- Hélice dos palas: Son más económicas que las de tres palas, pero más sensibles a vibraciones que ellas, se ilustra en la figura 2.7.
- Hélice tres palas: este tipo de hélice proporciona mayor suavidad en su funcionamiento, por lo que son las más utilizadas en la actualidad.



Figura 2.7: Aerogenerador eje horizontal bipala [1]

Los aerogeneradores de eje horizontal son muy superiores a los de eje vertical debido a:

- La velocidad del rotor; ya que puede ser controlada según el ángulo de ataque de las palas, pudiendo variarse este para proteger al aerogenerador contra vientos excesivos.
- La forma de la pala; puesto que puede ser optimizada aerodinámicamente.

Aunque también tienen inconvenientes como son:

- Es necesario un sistema de orientación.
- Ante vientos excesivos es necesario parar su funcionamiento para evitar problemas estructurales.

Capítulo 3

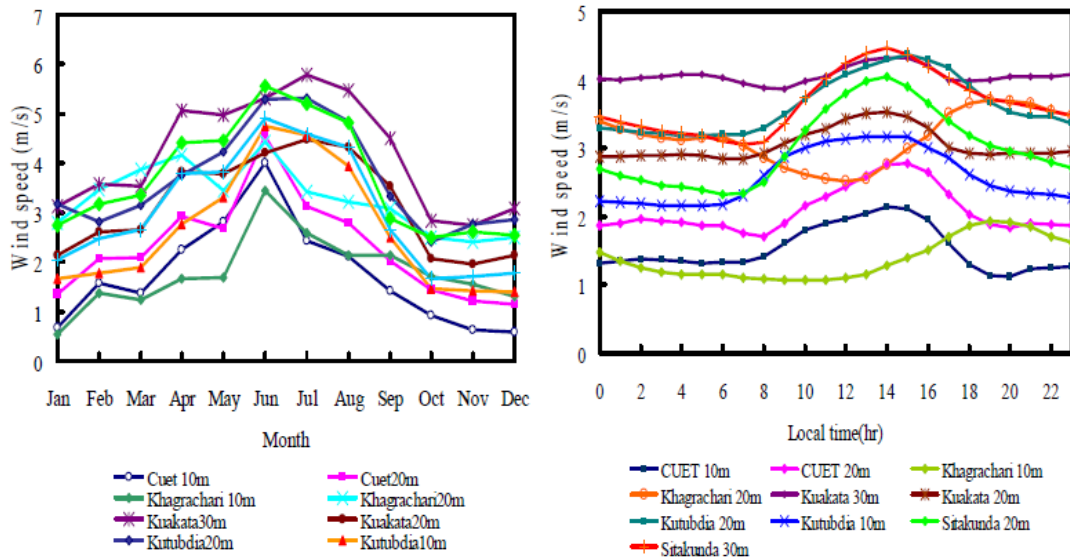
Turbomáquina

3.1. Introducción

Este apartado pretende proyectar un conjunto turbomáquina el cual sea capaz de proporcionar una potencia eléctrica suficiente para satisfacer la demanda eléctrica de un poblado rural. Para ello es necesario realizar un estudio acerca del viento disponible en la zona, así como conocer la demanda de electricidad. Una vez conocidos estos datos, el objetivo es encontrar una turbomáquina la cual ayudada por un ensamblaje sea capaz de satisfacer la demanda.

3.2. El viento en Bangladesh

Las condiciones climatológicas en Bangladesh no son las óptimas para la implementación de aerogeneradores dada la escasa velocidad de su viento. La media anual varía en función de la altitud y la localización y se encuentra entre unos valores promedio de 1.73 m/s y 4.17 m/s, registrándose los máximos en Kuakata, mientras que los valores mínimos se dan en Khagrachari.



Figuras 3.1 y 3.2: Viento promedio en función del mes y de la hora [3]

El promedio mensual muestra que el viento varía en función de dos estaciones muy marcadas. Se observan valores mínimos en invierno (octubre - marzo) y máximos en verano (abril - septiembre) y permanece prácticamente estable en función de la hora como se puede observar en las figuras 3.1 y 3.2.

Así como la orientación del viento varía en función de la localización de la ciudad como se observa en la figura 3.3, donde hay localizaciones como CUET, donde el viento prácticamente viene del norte, y otras como Khagrachari, donde el viento sopla en todas las direcciones. Este será un factor a tener en cuenta en el diseño del aerogenerador.

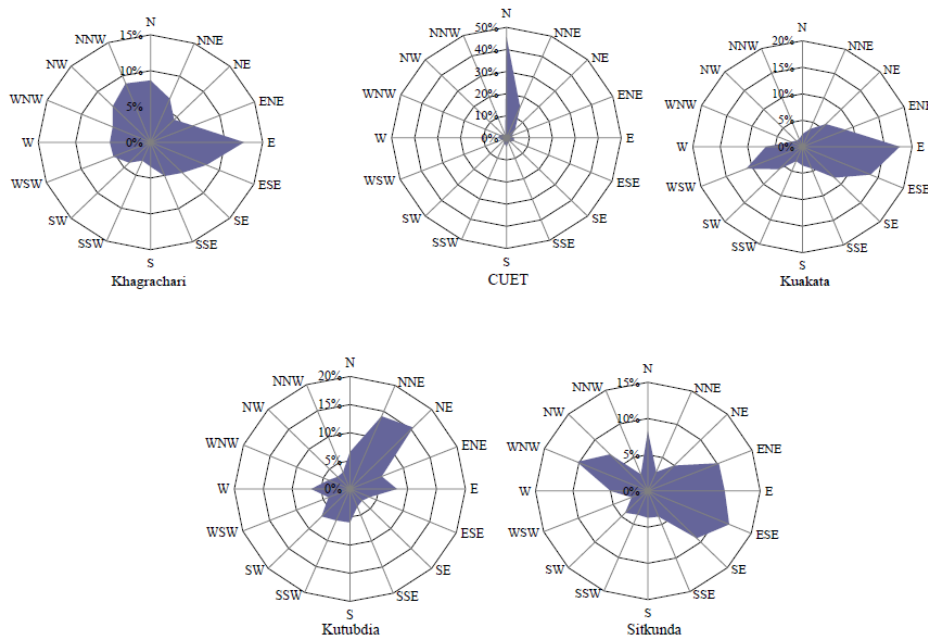


Figura 3.3: Orientación del viento en las distintas localidades [3]

Además se dispone de la frecuencia con la que se da cada velocidad de viento para algunas localidades, lo que será muy útil a la hora de diseñar el aerogenerador y predecir su modo de operación [3].

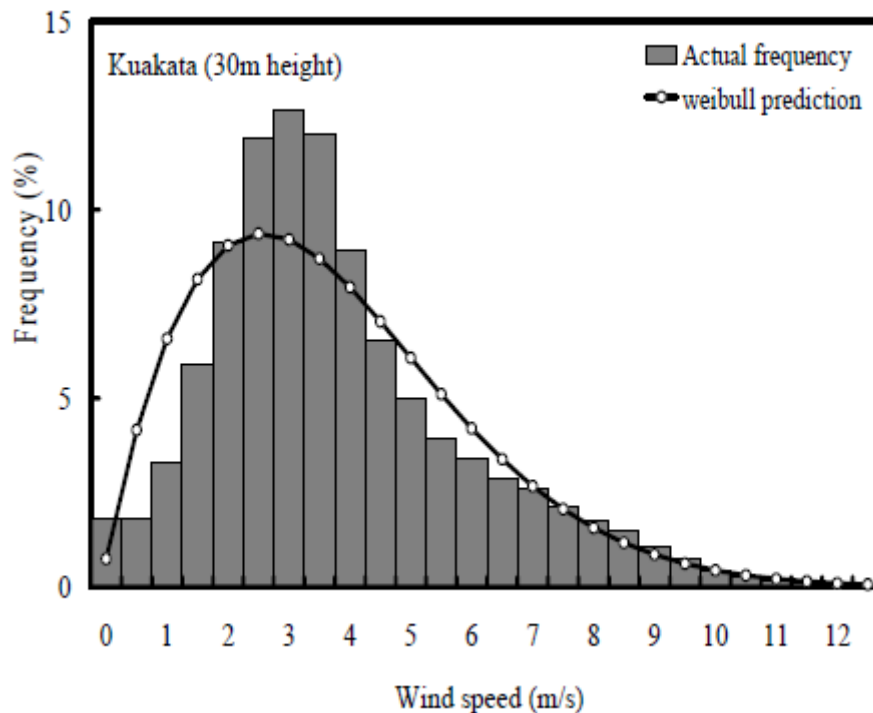


Figura 3.4: Distribución frecuencial de las velocidades del viento en Kuakata a 30m de altura [3]

Como se puede apreciar en la figura 3.4, la mayor parte del tiempo la velocidad es muy baja, por lo que habrá que intentar que el aerogenerador sea capaz de arrancar con la menor velocidad de viento posible.

3.3. Demanda eléctrica

El entorno al que pretende satisfacer la electricidad generada por el aerogenerador es un ambiente rural, por lo tanto el consumo es menor que un ambiente urbano. La electricidad demandada en una casa del entorno rural en el sureste asiático es unicamente requerida para iluminación, televisión y radio. En la tabla 1 se muestra el consumo eléctrico de una casa tipo, el cual es de 295Wh.

Aparato	Potencia	Uso diario	Energia Total
Lampara fluorescente (CLF) para la cocina	11 W	3 h	33 Wh
Lampara fluorescente (CLF) para sala de estar	11 W	5 h	55 Wh
Lampara fluorescente (CLF) para una habitación	11 W	2 h	22 Wh
Televisión en blanco y negro (12'')	20 W	4 h	80 Wh
AM/FM Radio	15 W	7 h	105 Wh
Total			295 Wh

Tabla 1: Necesidades eléctricas medias de un hogar

Suponiendo una población rural de aproximadamente 12 casas, se debe de tener en cuenta la eficiencia del equipo eléctrico, que se supone en torno al 70%, la población consumirá diariamente en torno a 5.05 kWh. Que se reparten fundamentalmente en dos periodos, uno por la mañana entre las 5 y las 9, y otro por la tarde entre las 4 y las 9 [4]. Como se puede observar en el gráfico 1.

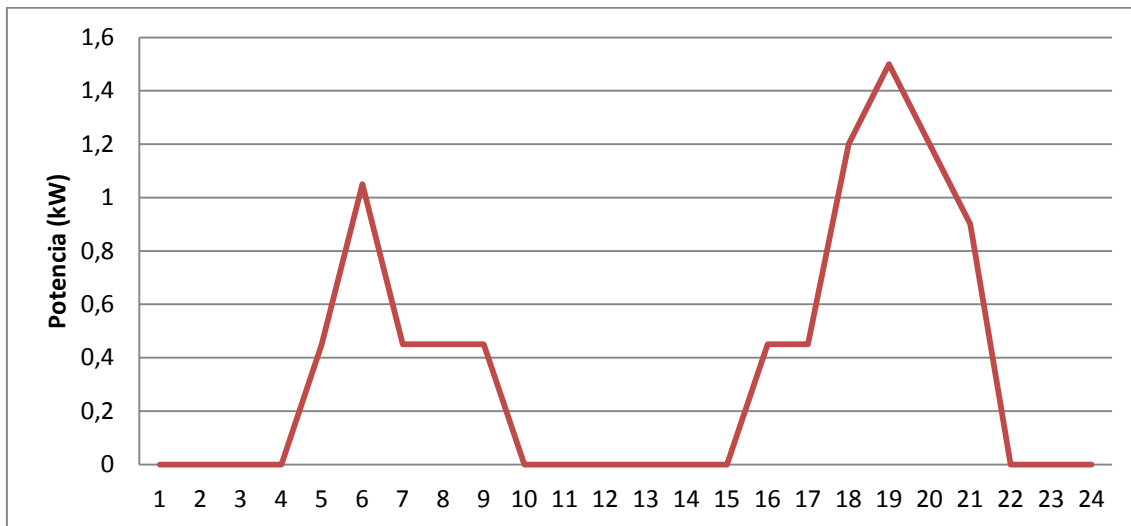


Gráfico 1: Distribución de la potencia eléctrica a lo largo del día

3.4. Tobera

Una tobera es un dispositivo que convierte la energía potencial de un fluido (en forma térmica y de presión) en energía cinética, por lo que es utilizado en turbomáquinas como inyector. El aumento de la velocidad que sufre el fluido en su recorrido a lo largo de la tobera es acompañado por la disminución de presión y temperatura, al conservarse la energía [5]. En este caso se estudia la tobera como forma de aumentar el flujo de viento que atraviesa el aerogenerador.

Una tobera ideal se caracteriza por cumplir la ecuación de continuidad, donde, $\rho \cdot A \cdot v = cte$, pero en este caso existen importantes pérdidas y no se cumple, puesto que esta abierto al medio.

El diseño propone una sección de entrada circular de 3.8m de diámetro y una sección de salida circular de 2m de diámetro. Su diseño se basa en una estructura compuesta de varios anillos de acero, unidos por barras entre sí, cuya superficie se cubre interiormente con chapa de aluminio.

Puesto que aumentar el número de anillos implica aumentar el peso de esta parte de la estructura, la cual va a estar en voladizo, se propone el diseño de una tobera en 2 tramos conicotruncados, para reducir el peso.

En el primer tramo, de 1.5m de longitud, se pasa de un diámetro de 3.8m a uno de 2.6m, mientras que en el segundo, también de 1.5m de longitud, se pasa de 2.6m de diámetro a los 2m de diámetro finales, como se observa en la figura 3.5.

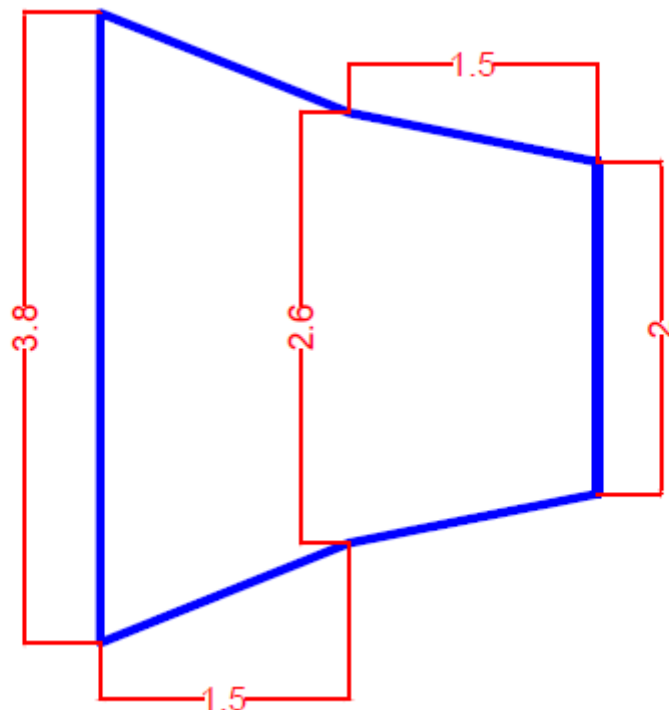


Figura 3.5: Sección de la tobera

La intención de esta tobera es que se produzca una gran reducción en el primer tramo y luego el flujo de salida se estabilice, para que llegue al aerogenerador en las mejores condiciones posibles.

En la figura 3.6 se muestra la relación entre la velocidad del viento a la salida y a la entrada de la tobera, que se obtiene mediante una simulación CFD, detallada en el Apéndice C.

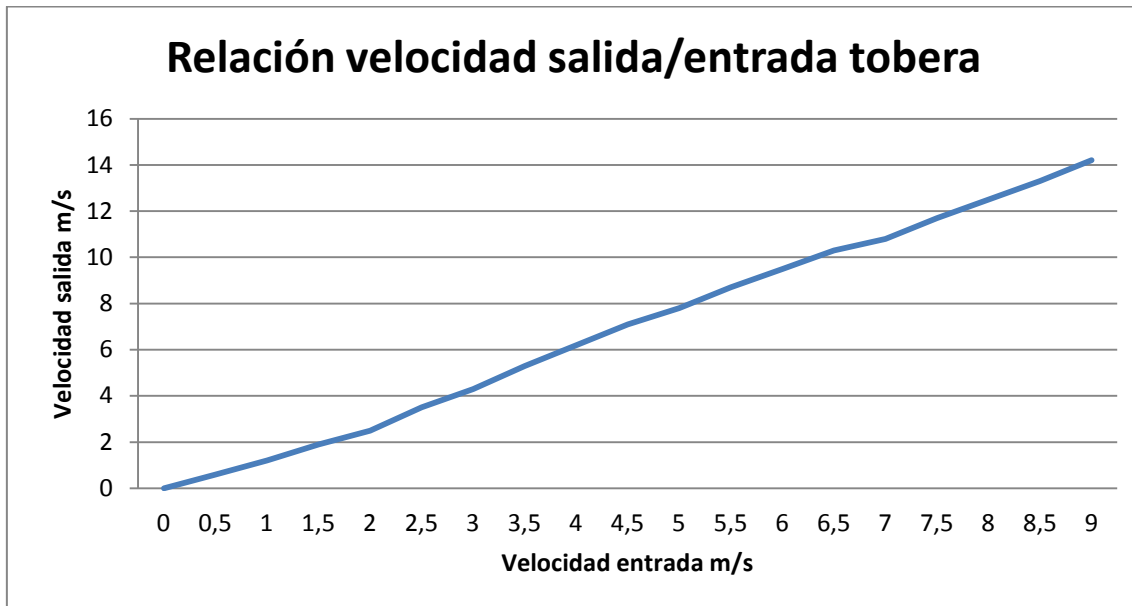


Figura 3.6: Relación velocidad salida/entrada tobera

3.5. Elección de la turbomáquina

Dada la escasa velocidad del viento, la elección de la turbomáquina debe de estar muy cuidada, por ello se descarta un aerogenerador de eje vertical ya que es necesaria la mayor velocidad de rotación posible, por lo que se busca un aerogenerador de eje horizontal.

Además, se descarta la elección de un aerogenerador accionado por resistencia (drag), debido a su escaso rendimiento, usándose uno accionado por sustentación (lift). También sería interesante encontrar un aerogenerador con el mayor número posible de palas, para que el momento ejercido por el viento en el eje sea mayor, lo que hará que arranque antes y como consecuencia, produzca electricidad con la menor velocidad de viento posible.

Tras observar las características de cada aerogenerador comercial, detalladas en el apéndice A, se aprecia que con el viento actual el aprovechamiento del viento es mínimo, ya que la mayoría de estos aerogeneradores comienzan a proporcionar electricidad a partir de los 3m/s aproximadamente, y hasta los 12-14m/s no alcanzan su potencia nominal, de ahí la decisión de usar una tobera, la cual incrementa la velocidad del viento a su paso por el rotor.

Se busca entre los diferentes aerogeneradores comerciales, con las siguientes características:

- Potencia comprendida entre 600W y 1.5KW, ya que con menos potencia podríamos llegar a no satisfacer la demanda, y con mas sobredimensionaríamos el sistema.
- Diámetro del rotor inferior a 2.5m, por la razón de que instalar una tobera implicaría que esta fuese de dimensiones desproporcionadas.

De entre todos los aerogeneradores disponibles se elige el aerogenerador FuturEnergy 1kW Wind Turbine, representado en la figura 3.7, porque entre otras razones tiene uno de los precios mas bajos del mercado, altas prestaciones, proporciona la potencia suficiente, buena eficiencia, arranca antes que la mayoría (porque tiene 5 palas) y proporciona voltajes de salida adecuados para cargar las baterías.

Este aerogenerador usa Permanent Magnet Generators, combinados con unas palas optimizadas de fibra de vidrio de altas prestaciones, que generan energía a bajas velocidades, y proporcionan alrededor de 1KW de potencia a 12.5m/s. Su principal uso es el de cargar baterías, en nuestro caso una batería de 48V. Su precio es aproximadamente de 931€ (IVA no incluido).



Figura 3.7: FuturEnergy 1kW Upwind Turbine [15]

Las especificaciones del aerogenerador son las siguientes [6]:

- Potencia Nominal: 1KW
- Velocidad de arranque: 2m/s
- Velocidad inicio actividad: 3.8m/s
- Velocidad máxima soportada: 50m/s
- Diámetro del rotor: 1.8m
- Número de palas: 5
- Tipo de generador: Imanes permanentes de 3 fases (rectificado a CC en el interior de la turbina)
- Peso: 22kg
- Diámetro del poste vertical: 5cm

La tabla 2 recoge la actuación del aerogenerador a diferentes velocidades de entrada. Así como las figuras 3.8 y 3.9 muestran la curva de potencia y la eficiencia del aerogenerador.

Wind (m/s)	Wind (mph)	Turbine RPM	Output Current (A)	Battery Voltage (V)	Power (W)	Power/Day
3.8	8.6	380	0.8	52.0	42	998
4.5	10.1	400	1.4	53.0	74	1781
5.6	12.6	420	2.6	54.0	140	3370
6.5	14.6	465	4.0	55.0	220	5280
8.0	18.0	480	7.4	56.0	414	9946
9.0	20.3	490	10.4	56.2	584	14028
10.0	22.5	510	14.0	56.3	788	18917
11.0	24.8	520	16.5	56.4	932	22357
12.5	28.1	540	20.0	56.6	1132	27168
14.0	31.5	610	26.0	56.6	1472	35318

Tabla 2: Tabla de actuación del aerogenerador [15]

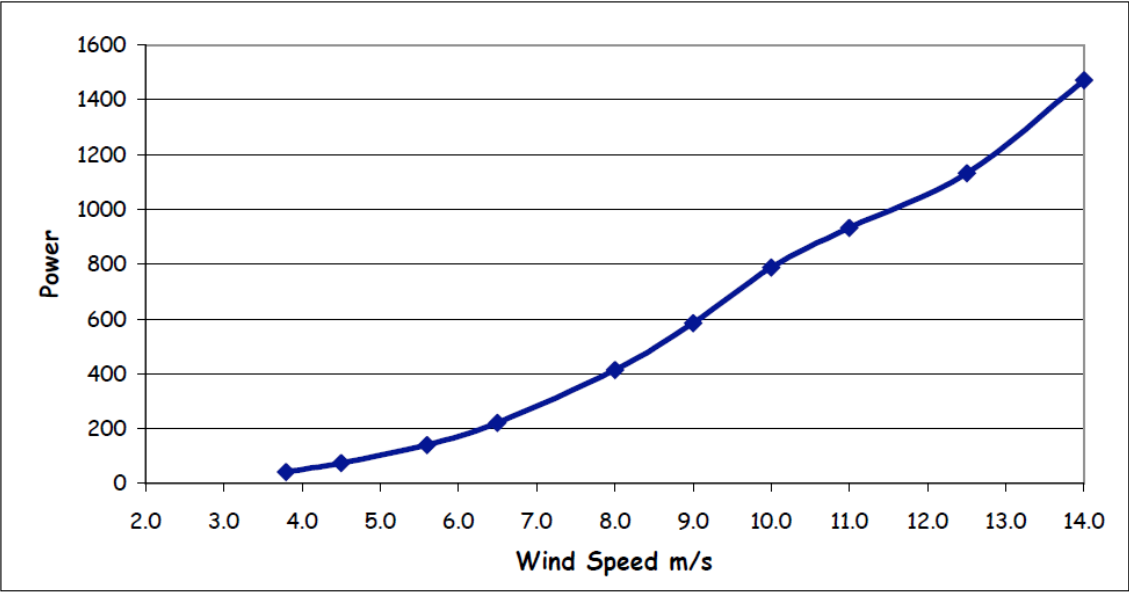


Figura 3.8: Curva de Potencia [15]

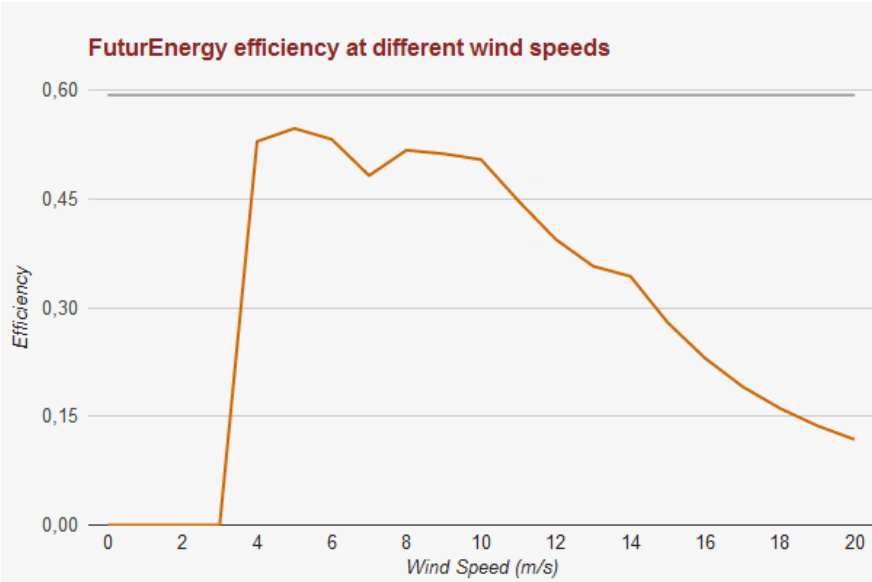


Figura 3.9: Eficiencia del aerogenerador [15]

En consecuencia, a la vista de estos datos y teniendo en cuenta la distribución frecuencial de velocidades (considerando la localidad de Kuakata) se puede hacer una aproximación de la energía eléctrica que el aerogenerador proporcionará, representada en la tabla 3.

Vel. Entrada	Vel. Salida	Frecuencia	Con Tobera		Sin Tobera	
			Potencia	kWh	Potencia	kWh
0	0	1.5	0	0	0	0
0.5	0.6	1.5	0	0	0	0
1	1.2	3.2	0	0	0	0
1.5	1.9	5.6	0	0	0	0
2	2.5	9	0	0	0	0
2.5	3.5	12	42	5.04	0	0
3	4.3	12.5	74	9.25	0	0
3.5	5.3	12	110	13.2	42	5.04
4	6.2	9	200	18	60	5.4
4.5	7.1	6.3	300	18.9	74	4.662
5	7.8	5	414	20.7	110	5.5
5.5	8.7	4	560	22.4	140	5.6
6	9.5	3.7	700	25.9	180	6.66
6.5	10.3	3.4	800	27.2	220	7.48
7	10.8	3	900	27	290	8.7
7.5	11.7	2.5	1000	25	360	9
8	12.5	1.5	1132	16.98	414	6.21
8.5	13.3	1.2	1250	15	500	6
9	14.2	3.1	1472	45.632	600	18.6
suma		100		290.202		88.852

Tabla 3: Actuación del aerogenerador con y sin tobera

Según estos datos, el aerogenerador proporcionará una potencia media diaria de 290.2W, lo que implica que al año generará 2.542MWh de energía eléctrica media, energía suficiente para satisfacer la demanda anual media del poblado que sería de 1.843MWh.

Además estos datos justifican la presencia de la tobera, con la que se obtiene mas de 3 veces la energía eléctrica que se obtendría sin ella.

3.6. Elementos auxiliares

Estos elementos son los encargados de ajustar tanto la tobera como el aerogenerador en la posición indicada, haciendo que todo este equilibrado y funcione correctamente. Todos los elementos ensamblados los recoge la figura 3.10.

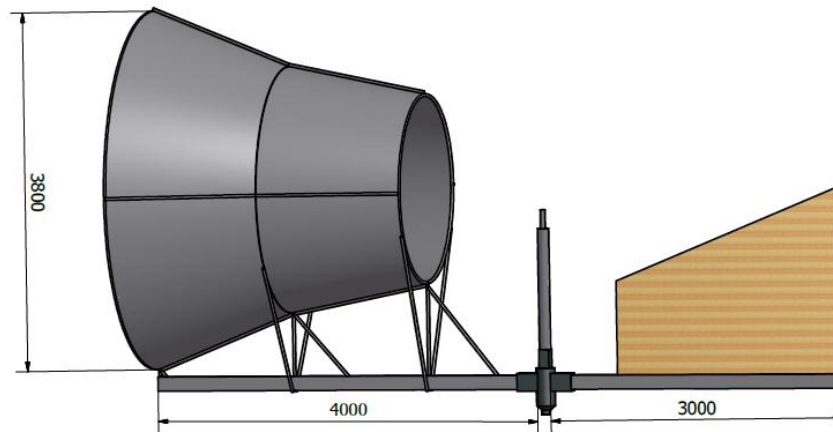


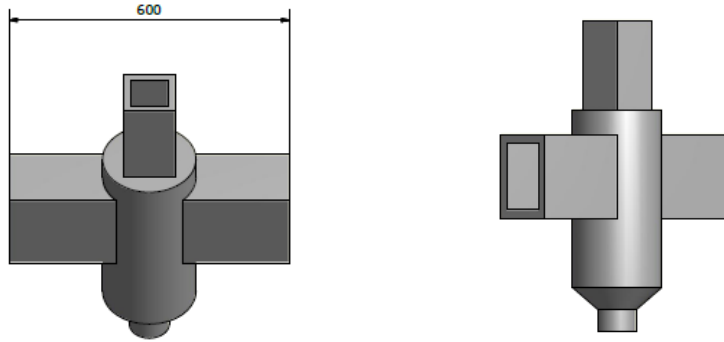
Figura 3.10: Vista del conjunto final (cotas en mm)

3.6.1. Eje central

Su función es fijar todos los elementos respecto al eje. En él se insertan los diferentes conjuntos de elementos para que todo funcione adecuadamente y esté nivelado.

El eje central se acopla a la estructura por la parte inferior de este. La estructura es de revolución y permite el giro del conjunto respecto del eje, para que todo el conjunto se oriente en función de la dirección del viento.

El eje tiene dos aberturas a los lados en las cuales se introducen las barras que soportan la tobera y la veleta. En la parte superior, se encuentra una abertura de sección cuadrangular donde se inserta el conjunto que soporta el aerogenerador, todo esto se observa en las figuras 3.11 y 3.12.



Figuras 3.11 y 3.12: Diferentes vistas del eje central (cotas en mm)

El elemento que hace girar el eje de la pieza es un rodamiento axial de rodillos cilíndricos, el cual irá acoplado a la estructura, uniendo el eje con ella y permitiendo el giro. Los datos del rodamiento se especifican en el apéndice F.

3.6.2. Poste superior

El poste superior tiene la función de unir el aerogenerador con la estructura y mantener el eje horizontal del rotor a la altura adecuada, es decir al nivel del eje horizontal de la tobera.

Por ello la parte superior es cilíndrica, de diámetro 50mm para introducirse en el interior del tubo que soporta al aerogenerador (que viene de serie). Tras esta inserción, la unión se suelda para que el aerogenerador este orientado correctamente, mientras que la inferior es un prisma cuadrangular que encaja y se orienta adecuadamente en el eje central. El poste superior se ve en la figura 3.13.



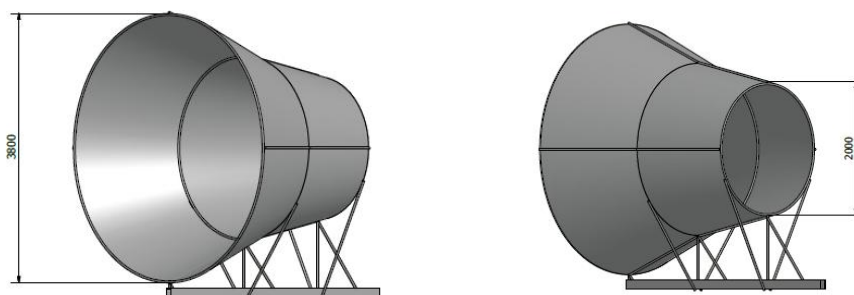
Figura 3.13: Vista del poste superior

3.6.3. Conjunto tobera

La tobera, como se mencionó en apartados anteriores, está diseñada en chapa de aluminio, de espesor 0.5mm. Sin embargo, el soporte son tubos de acero, todos con la misma sección: 26.9mm de diámetro y 2mm de espesor. La sección elegida lo ha sido con el fin de reducir el peso manteniendo su función estructural.

La estructura consiste de 3 anillos, de diámetros 3.8m, 2.6m y 2m, unidos entre sí por 4 tubos, dispuestos a 90° unos de los otros siguiendo el eje horizontal de la tobera.

Estos anillos están unidos a la barra por 4 tubos, soldados en ambos extremos, y en las posiciones mostradas en las figuras 3.14 y 3.15.



Figuras 3.14 y 3.15: Diferentes vistas del conjunto tobera (cotas en mm)

La barra que soportará la tobera es una barra de sección rectangular (150mm x 100mm) y 6mm de espesor. El Apéndice B incluye los cálculos justificativos de este elemento estructural.

La longitud de la barra es de 4.2m. En los primeros 3m se soporta la tobera y los últimos 20cm están incrustados en el eje central.

3.6.4. Conjunto veleta

Este conjunto tiene 2 funciones: hacer de veleta para orientar el aerogenerador en la dirección del viento; y contrarrestar el momento del conjunto tobera ejercido en el eje central para minimizar el momento resultante en este, e intentar igualarlo a cero, para que el conjunto final sea lo mas estable posible.

Este conjunto se inserta en el eje central de la misma forma que el conjunto tobera. La barra que soporta la veleta tiene la misma sección que la barra del conjunto tobera. Posee 3.2m de longitud de los que 0.2m estan incrustados en el eje. Adicionalmente, se disponen varias pletinas verticales soldadas a esa barra, con la función de sostener la veleta mediante uniones atornilladas, como se aprecia en la figura 3.16.

La veleta es de madera, siendo dimensiones las adecuadas para equilibrar el conjunto final.

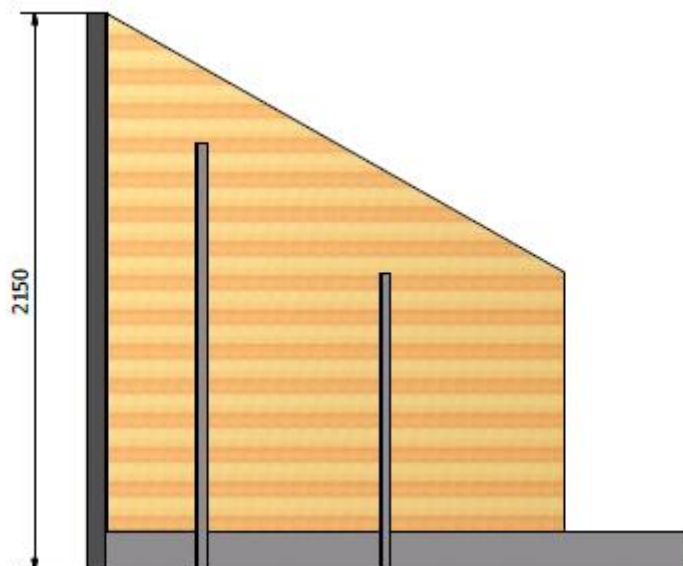


Figura 3.16: Vista del conjunto veleta (cotas en mm)

Capítulo 4

Estructura

4.1. Introducción

Tras la elección de la turbomáquina y el diseño de los componentes auxiliares al mismo, es necesario diseñar la estructura que permita al aerogenerador alcanzar los 30m de altura necesarios para poder aprovechar un viento superior. El diseño de la estructura consta de 2 apartados: la torre, donde se hablará de los materiales utilizados, así como las diferentes configuraciones utilizadas y el método de análisis; y la unión entre torre y aerogenerador, donde se explicarán el diseño y los componentes utilizados. No se diseña cimentación pues no se conocen las características de los terrenos donde se implementaran estos aerogeneradores.

4.2. Torre

Dada la naturaleza de este proyecto, el cual debe realizarse con un coste sostenible y construirse “in situ” y por trabajadores locales, hay que estudiar la forma de construcción local.

Hablar de construcción en Bangladesh es hablar de bambú, y lo es más todavía en las zonas menos desarrolladas. El bambú es una forma de vida para la población: construyen sus casas con él, fertilizan sus campos con sus cenizas, duermen en colchones hechos de ramitas e incluso se alimentan de jóvenes brotes. Por ello, se estudiará el diseño de una torre construida con bambú.

Por otra parte, en caso de que la torre de bambú no tenga unas buenas prestaciones, se planteará el diseño comparativo con una torre de acero.

4.2.1. Bambú

El bambú es el nombre de una subfamilia de plantas que pertenecen a la familia de las gramíneas, una de las familias botánicas más extensas e importantes para el hombre. Los hay de diferentes tamaños: pueden ser plantas pequeñas de menos de 1m de largo y medio cm de diámetro, aunque también los hay gigantes de unos 25m de alto y 30cm de diámetro [7].

Es un recurso sostenible forestal muy importante en zonas de bajos recursos, y dada su alta resistencia y flexibilidad se le conoce como el acero vegetal, de ahí que sea tan usado en construcción. Crece en países cercanos al ecuador, con altas precipitaciones, localizándose principalmente en América central y del sur, en el sur de África y en el sur asiático.

Su consumo en Bangladesh aumenta año a año con una proyección de la demanda para el año 2013 de 901.5 millones de cañas, de las cuales el 80% proviene de bosques locales [8].

Hay 33 especies diferentes de bambú en el país, cada una de diferentes dimensiones y propiedades, lo que permite llegar a construir multitud de objetos de diferentes medidas y dimensiones [9].

En cuanto a las uniones entre cañas, también hay multitud de tipologías, pero las utilizadas en esta estructura son las uniones atadas entre varias barras, las cuales pueden considerarse cuasi rígidas, dada la poca elasticidad de la cuerda, como puede observarse en las figuras 4.1 y 4.2.



Figuras 4.1 y 4.2: Diferentes formas de unión entre cañas de bambú. [8]

Dado que para la construcción de esta estructura son necesarias cañas grandes y muy resistentes, de acuerdo con los recursos locales disponibles en Bangladesh se propone la utilización de dos especies diferentes:

- Bambusa Bambos: la cual llega a alcanzar los 30 m de altura, posee un diámetro de entre 15 y 18 cm y un espesor de 3.4 cm en la base y 4 mm en la punta.
- Dendrocalamus Giganteus: con una altura de entre 24 y 30 m, diámetro entre 20 y 30 cm y un espesor de 2 cm en la base y 5 mm en el extremo superior.

Se decide utilizar bambú Dendrocalamus Giganteus para los postes verticales y bambú Bambusa Bambos para las uniones horizontales y diagonales. De esta manera el poste vertical tiene un mayor momento de inercia y los horizontales y verticales tienen mayor espesor. [10][11][12][13]

La tabla 4 muestra las propiedades mecánicas de estas especies:

	Dendrocalamus Giganteus	Bambusa Bambos
Densidad	0.74 g/cm ³	0.71 g/cm ³
Resistencia Máxima Tracción	177 MPa	121 MPa
Resistencia Máxima Compresión	70 MPa	61 MPa
Resistencia Máxima Cizalladura	10.6 MPa	9.9 MPa
Resistencia Máxima Flexión	193 MPa	143 MPa
Modulo Young Longitudinal	17 GPa	17GPa
Modulo Young Radial	14 GPa	14 GPa

Tabla 4: Propiedades mecánicas del bambú

Una de las características de este material es su ortotropía, es decir posee diferentes propiedades mecánicas en sus diferentes dimensiones. Esta es una característica muy importante del material, ya que hay que considerar diferentes módulos de Young en función de la dirección, en este caso en la dirección longitudinal posee un módulo elástico y en el resto de direcciones posee otro. Este factor será muy importante a la hora de simular la estructura, pues será necesario utilizar un software que simule estructuras de barras ortótropas.

4.2.2. Estructuras verticales

En cuanto a la forma de la estructura, teniendo en cuenta los materiales a utilizar, bambú o acero, la forma de la estructura variará en función de cada uno de ellos, considerando que la construcción con bambú será mucho más rudimentaria e imprecisa, primarán las formas rectas y se intenta evitar una estructura con una sección diferente a cada metro de altura, mientras que el acero permite una mayor variedad de tipologías.

La mejor opción sería una tipología estructural de sección variable con la altura, que intente compensar el momento máximo generado por el viento con el peso de la torre, esta igualdad permitiría calcular la forma exterior óptima [14].

En este caso no es necesario alcanzar un óptimo, lo necesario es tener en cuenta una cierta funcionalidad, y que la estructura soporte las fuerzas del viento y la carga, consiguiendo una estructura que llegue a los 30 metros.

4.2.3. Método de análisis

El análisis estructural de la torre es realizado mediante el método de los elementos finitos usando el software comercial ANSYS 14. Es un análisis en el que se usan elementos tipo barra, pues en este caso una de las dimensiones es mucho mayor que el resto. Es un análisis estático, lineal y ortótropo en el que se pretenden obtener los desplazamientos máximos, las tensiones de Von Mises y las tensiones de tracción y compresión.

Se introducen barras de sección circular con las siguientes dimensiones:

- Barras Verticales: Bambú Dendrocalamus Giganteus, diámetro 200mm y espesor 20mm
- Barras Horizontales y Diagonales: Bambú Bambusa Bambos, diámetro 170mm y espesor 30mm

Se consideran como barras empotradas los apoyos inferiores de la estructura, ya que en el diseño real estas barras estarán introducidas en la zapata de hormigón.

Además se consideran dos tipos de simulaciones: en primer lugar el caso funcional, se considera el análisis para una velocidad del viento de 6m/s, ligeramente superior a la media; en segundo lugar el caso extremo, de vientos huracanados, los cuales se pueden repetir en el país cada cierto número de años. En este caso el aerogenerador es desalojado y se consideran vientos de 30m/s.

Las fuerzas consideradas en el primer caso son: el peso en la parte superior de la estructura, (700 kg) un valor mayor al usual, en el que se quiere considerar el caso extremo en el que hubiera cualquier tipo de precipitación o se estuviera manipulando por uno o varios operarios; la otra carga es la fuerza del viento, que se aproxima mediante la fórmula 26.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (26)$$

Donde ρ es la densidad del viento, A es el área proyectada de la estructura y v la velocidad del viento, y donde se considera un viento extremo que pudiese darse durante ciclones y repartido de forma uniforme por toda la superficie expuesta.

Mientras que en la segunda simulación no se tendrá en cuenta el peso del aerogenerador puesto que este habrá sido desalojado de su posición habitual. Esto no es una aplicación del Eurocódigo ya que la estructura no está proyectada en Europa y ante la imposibilidad de encontrar una norma que sea referencia en la zona, se realizan estos cálculos aproximados.

4.2.4. Diferentes configuraciones bambú

Antes de obtener cualquier tipo de resultado o establecer cualquier configuración, es necesario imponer ciertos límites a la estructura, los cuales los disponemos en forma de coeficiente de seguridad. Se considera un coeficiente de seguridad igual a 8, dado que durante todo el proceso se realizan ciertas suposiciones acerca del bambú, su comportamiento y la forma de construcción, que pueden distorsionar la realidad. Por lo que se definen los siguientes valores máximos de tensión que pueden alcanzar las barras, adjuntos en la tabla 5.

Tipo	Tracción	Compresión	Corte	Flexión
Dendrocalamus Giganteus	22.12 MPa	8.75 MPa	1.325 MPa	24.125 MPa
Bambusa Bambos	15.12 MPa	7.62 MPa	1.23 MPa	17.875 MPa

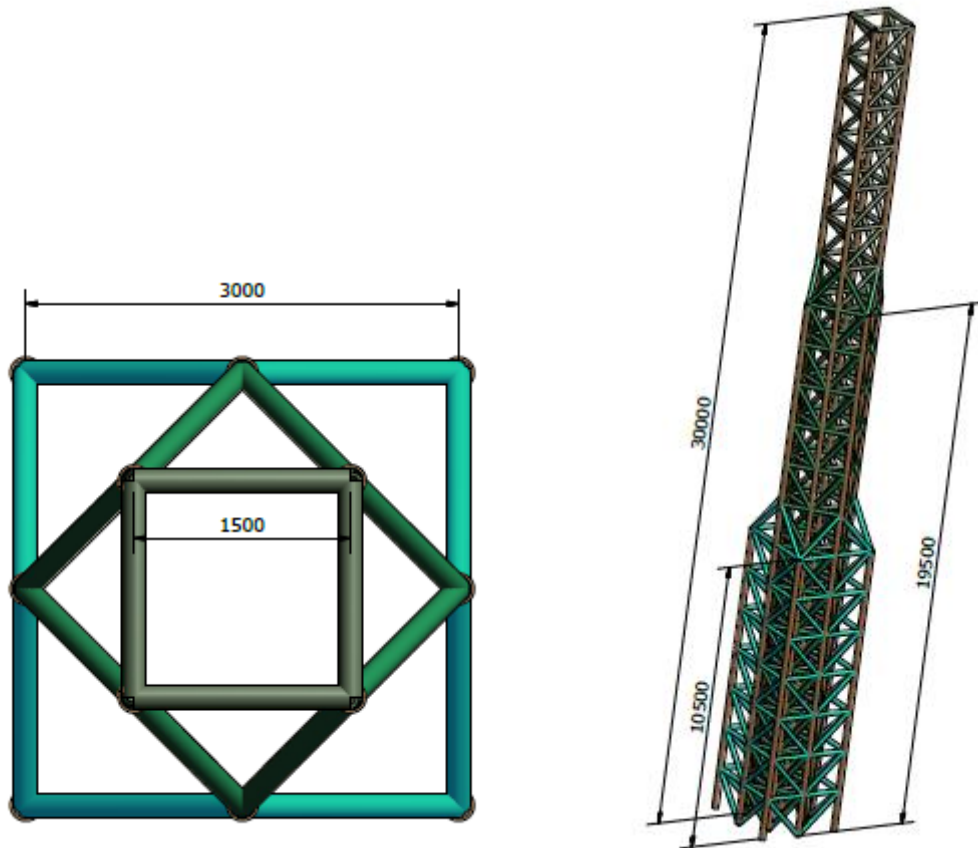
Tabla 5: Valores máximos admisibles del bambú en la estructura

Para la construcción de la torre de bambú se proponen dos alternativas:

- Celosía de sección cuadrangular
- Celosía de sección triangular

En ambos casos, el área varía conforme cambia la altura. Se definen 3 tramos diferentes, cada 10 metros, a partir de los cuales se reduce el área. Se propone este tipo de estructura para que su sección se adapte al momento flector soportado.

Se presentan a continuación diferentes variantes: la primera de ellas consta de secciones cuadrangulares inscritas en otras, como muestran las figuras 4.3 y 4.4.



Figuras 4.3 y 4.4: Planta y vista lateral de la torre (cotas en mm)

Obteniendo los siguientes resultados:

Caso nominal:

- Desplazamiento máximo: 1.92 mm
- Tensión máxima tracción: 0.36 MPa
- Tensión máxima compresión: 0.88 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 0.88 MPa

Caso extremo:

- Desplazamiento máximo: 42.59 mm
- Tensión máxima tracción: 3.82 MPa
- Tensión máxima compresión: 4.72 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 4.72 MPa

Por otro lado se trabaja con la sección triangular, en este caso se fija la sección de 1.5m de lado en un triángulo equilátero inscrito, como se ve en las figuras 4.5 y 4.6.

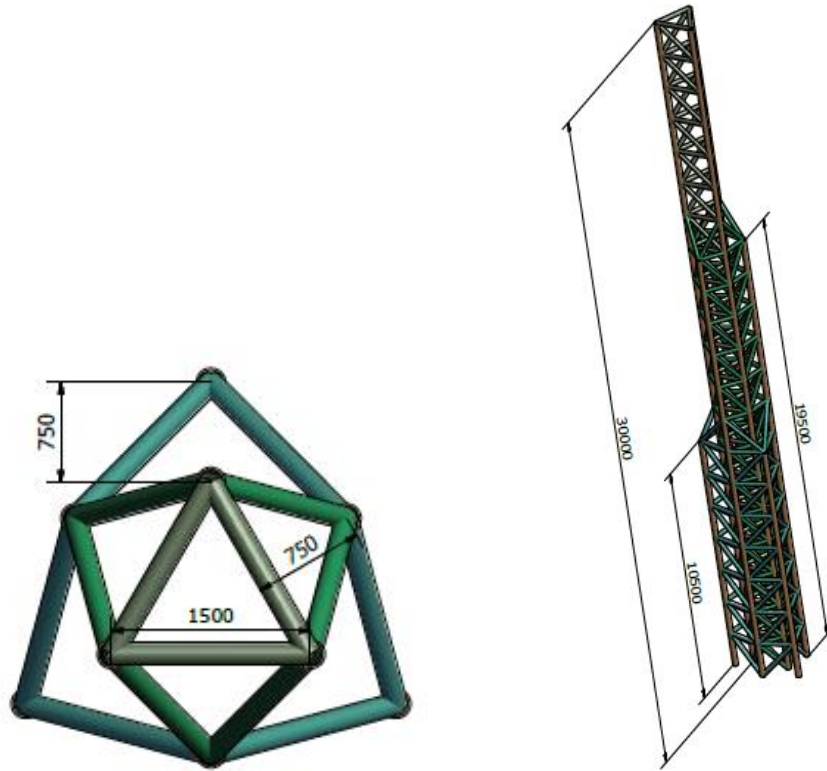


Fig 4.5 y 4.6: Planta y vista lateral de la torre (cotas en mm)

Obteniendo los siguientes resultados:

Caso nominal:

- Desplazamiento máximo: 3.5 mm
- Tensión máxima tracción: 0.44 MPa
- Tensión máxima compresión: 0.99 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 0.99 MPa

Caso extremo:

- Desplazamiento máximo: 79.3 mm
- Tensión máxima tracción: 6.57 MPa
- Tensión máxima compresión: 7.04 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 7.04 MPa

La principal razón por la que se plantea esta torre es el ahorro de material, la intención es lograr este ahorro sin comprometer en exceso la funcionalidad de la estructura. En este caso se ahorra un 27.6% de material, y los cálculos de la torre no quedan alterados en exceso, por ello es una propuesta a tener muy en cuenta. En el apéndice D se muestran los análisis de estructura y de material de las diferentes configuraciones.

4.2.4. Configuración final

En vista de los resultados obtenidos del análisis de todas las estructuras simuladas, teniendo en cuenta que todas estas propuestas son funcionales, y podrían ser implementadas, el ámbito decisivo es el económico. Y aunque el bambú sea un recurso natural barato, es conveniente reducir la cantidad de material usado, ya que de esta manera el coste y el impacto serán menores. Por ello la torre elegida es la torre de bambú con sección triangular, pues reduce un 27.6% de material, logrando así una reducción notable del coste, la cual se aprecia en la figura 4.7.



Figura 4.7: Vista de la torre de sección triangular

4.3. Unión superior

La unión superior se encarga de mantener fijo el eje del aerogenerador, soporta su peso y transmite los esfuerzos a la estructura. Para ello se diseña un ensamblaje como el que se ve en la figura 4.8, el cual consta de varias piezas.

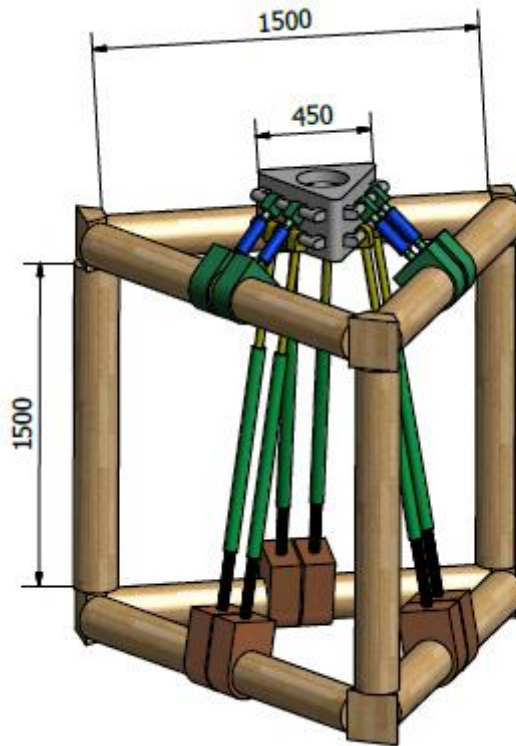


Figura 4.8: Ensamblaje unido a la parte superior de la torre (cotas en mm)

El prisma triangular central tiene un agujero cilíndrico en su parte superior, el cual aloja al rodamiento que enganchará con el eje central del conjunto aerogenerador y permitirá el giro para orientarse según la dirección del viento. Además en cada lateral se alojan 2 barras a distinta altura, que tienen el objetivo de acoplarse a los brazos extensibles que transmiten los esfuerzos a la torre. En el interior del agujero del prisma está alojado el rodamiento que une el ensamblaje con el eje, permitiendo el giro del conjunto aerogenerador.

Los otros componentes de este ensamblaje son los brazos extensibles, encargados de transmitir la fuerza a la torre. Se usan un total de 12, 6 a una altura y 6 en la otra, y puesto que trabajamos con secciones triangulares, se apoyan 2 brazos en cada barra.

Estos brazos constan de 3 piezas diferentes. Dos de ellas tienen un agujero cilíndrico tal como se representa en la figura 4.9, se inserta en las barras, uno de ellos en la caña de bambú y el otro en la barra lateral del prisma. Estas piezas constan de una rosca macho en su cilindro lateral.



Figura 4.9 Componente del brazo extensible (cotas en mm)

La pieza restante es un cilindro hueco con rosca hembra en su interior, de modo que la unión roscada de estos tres componentes forma el brazo extensible.

Llegados a este punto, una vez diseñados los componentes es necesario analizar su comportamiento, analizamos los brazos y la resistencia de las cañas de bambú, ambos análisis se muestran en el apéndice E, Donde se comprueba que ambos elementos trabajan correctamente.

Capítulo 5

Distribución Eléctrica

5.1. Esquema general

Una vez dimensionado el aerogenerador, los ensamblajes auxiliares y la estructura, es momento de proyectar el sistema de distribución eléctrica que se utilizará. En este caso, dado que el objetivo es el suministro eléctrico en pequeños poblados, se propone un sistema de distribución para estaciones tipo isla, como el representado en la figura 5.1, ya que los elementos que lo componen son fáciles de encontrar, además de ser baratos y robustos.

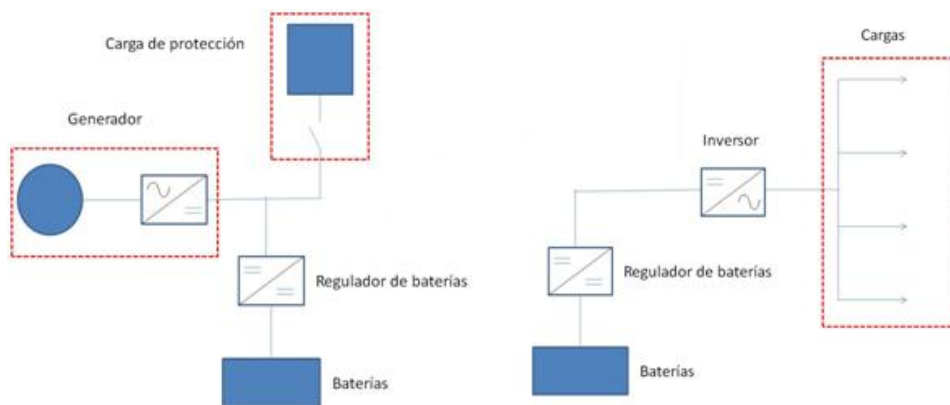


Figura 5.1: Esquema de distribución

El sistema consta de los siguientes elementos:

- Generador Eléctrico/Rectificador
- Regulador de Baterías
- Baterías
- Carga de Protección
- Inversor

En este sistema de distribución la energía eléctrica generada por el aerogenerador es rectificadora y transformada a corriente continua a 48V. La corriente tiene el propósito de cargar baterías, donde el proceso está controlado por un regulador que impide que estas se carguen en exceso. Adicionalmente incluye una carga de protección, dispositivo que solo actuará cuando se dé un exceso de energía y las baterías no sean capaces de absorberla, activándose para disiparla en forma de calor.

Posteriormente las baterías se trasladan al lugar de consumo, donde mediante un inversor la corriente continua se transforma en corriente alterna, 230V y 50Hz, para su uso domestico. También es necesario un regulador de baterías que impida la carga y descarga completa de las mismas.

5.2. Generador eléctrico

El generador eléctrico es el aerogenerador, está incluido en él, y proporciona una tensión prácticamente constante a diferentes intensidades eléctricas en función de la velocidad del viento, tal como muestra la tabla 6.

Wind (m/s)	Wind (mph)	Turbine RPM	Output Current (A)	Battery Voltage (V)	Power (W)	Power/Day
3.8	8.6	380	0.8	52.0	42	998
4.5	10.1	400	1.4	53.0	74	1781
5.6	12.6	420	2.6	54.0	140	3370
6.5	14.6	465	4.0	55.0	220	5280
8.0	18.0	480	7.4	56.0	414	9946
9.0	20.3	490	10.4	56.2	584	14028
10.0	22.5	510	14.0	56.3	788	18917
11.0	24.8	520	16.5	56.4	932	22357
12.5	28.1	540	20.0	56.6	1132	27168
14.0	31.5	610	26.0	56.6	1472	35318

Tabla 6: Tabla de actuación del aerogenerador [15]

5.3. Regulador de baterías

Se encarga de regular la energía absorbiendo los excesos y suministrando los déficits que tenga. Estará dimensionado en función de la potencia máxima de aerogenerador, en este caso 1,5kW. La distribución se realiza a 48V ya que a este voltaje nominal se aumenta la eficacia del aerogenerador.

El aparato debe de estar regulado en función del estado de carga (SOC), ya que para asegurar una larga vida de las baterías estas no deben de descargarse por debajo del 20% y no deben cargarse por encima del 80% de capacidad.

Por lo que en esta instalación serán necesarios dos reguladores, uno de ellos en el lugar de la carga, el cual impida a la batería cargarse por encima del 80% de su capacidad, y el otro en el poblado, el cual impida que la batería se descargue por debajo del 20% de su capacidad. De esta forma se duplica o triplica la vida de la batería.

5.4. Batería

5.4.1. Funcionamiento

Las baterías son dispositivos dedicados al almacenamiento de energía eléctrica, se encargan de convertir la energía eléctrica en energía química y viceversa. De esta forma es posible almacenar energía eléctrica en forma de energía química y utilizarla en el momento requerido.

La unidad básica de la batería es la celda, pudiendo estar formada por varias celdas en serie o en paralelo con el fin de alcanzar la tensión y capacidad requerida.

La celda funciona según un proceso de reacciones químicas de oxidación (liberación de electrones) y reducción (captación de electrones). Está compuesta por 4 elementos: el ánodo o electrodo negativo, es el elemento que se oxida y aporta electrones al circuito exterior; el cátodo o electrodo positivo, es el elemento que se reduce aceptando electrones del exterior; el electrolito, el cual es un conductor iónico que permite la transferencia de electrones en el interior de la celda; y el separador, un elemento que proporciona aislamiento eléctrico entre electrodos y permite libre circulación de iones a través del electrolito, como se observa en la figura 5.2 [16].

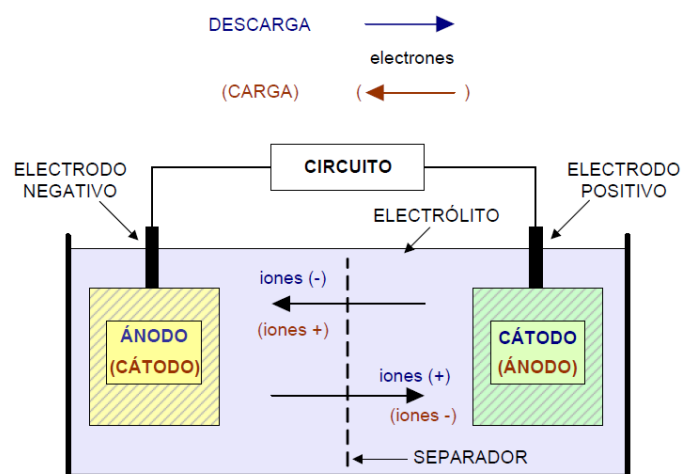


Figura 5.2: Elementos básicos de una batería [16]

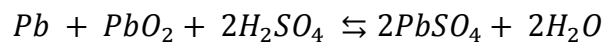
Durante la carga ocurren los mismos procesos electroquímicos debido a la reversibilidad de las reacciones redox, en ese caso el cátodo se comporta como ánodo y viceversa.

5.4.2. Tipos de baterías de media y alta capacidad

5.4.2.1. Baterías de Pb-Ácido

Las baterías de plomo-ácido constituyen una parte muy importante en el mercado mundial de baterías, en torno al 50%, dado que es la tecnología más conocida y tiene un precio bajo.

Se utiliza dióxido de plomo como electrodo positivo y plomo metálico de estructura porosa como electrodo negativo. El electrolito es ácido sulfúrico diluido en material acuoso, y la reacción redox completa es:



Esta batería presenta ventajas:

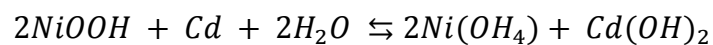
- Alta tensión por celda, 2V/celda, lo que reduce el número final de celdas
- Suministra bien ante picos de corriente altos
- Buen grado de reversibilidad del proceso electroquímico de carga y descarga
- Fácil reciclado

Mientras que sus inconvenientes son:

- Peso excesivo
- Baja energía específica (30Wh/kg)
- No admite sobrecargas ni recargas profundas
- Corta vida cíclica (entre 500 y 600 ciclos)
- No acepta una carga rápida

5.4.2.2. Baterías de Ni-Cd

Las baterías de níquel cadmio están consolidadas en el mercado, aunque con una cuota inferior a las de Pb-Ácido. El cátodo está compuesto de hidróxido de níquel, mientras que el ánodo está compuesto de cadmio. El electrolito es hidróxido de potasio, donde la reacción redox es:



Desde el punto de vista funcional las baterías de Ni-Cd superan a las de Pb-Ácido, y poseen ventajas como:

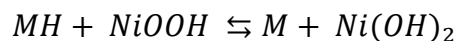
- Mayor energía específica, 50Wh/kg
- Larga vida cíclica, en torno a 1500 ciclos
- Robustez
- Gran fiabilidad

Y tiene inconvenientes como:

- Precio elevado (el doble que las de Pb-Ácido)
- El cadmio es un material muy contaminante
- Baja tensión nominal de celda, 1,2V/celda

5.4.2.3. Baterías de Ni-Hidruro Metálico

Las baterías de níquel-hidruro metálico constituyen una tecnología de batería cada vez más consolidada en el mercado aunque no tan establecida como las anteriores. El ánodo de esta batería está formado por hidróxido de níquel y el cátodo es una aleación de hidruro metálico, mientras que el electrolito es hidróxido de potasio, donde la reacción redox global es:



Posee unas características similares a las baterías de Ni-Cd, con ventajas:

- Elevada potencia, energía y densidad específica
- Menos contaminante que el cadmio

Por el contrario sus inconvenientes:

- Alto precio
- Poca disponibilidad en el mercado, no se producen de forma masiva
- Alta auto descarga
- Mal funcionamiento a altas temperaturas

5.4.2.4. Baterías de Ni-Fe

Las baterías de níquel-hierro se comercializaron durante los primeros años del siglo pasado. Estas baterías usan níquel como electrodo positivo y hierro como electrodo negativo, donde el electrolito es hidróxido de potasio.

Sus principales ventajas son:

- Bajo coste
- Fácil fabricación
- Admiten sobrecargas
- Larga vida útil

Y su principal desventaja es la baja eficiencia, en torno al 65%

5.4.2.5. Baterías de Li-Ion

Son unas de las baterías que más se están desarrollando en el presente, usando materiales ligeros y con altas densidades de energía, están perfectamente consolidadas como baterías de pequeña capacidad, por el contrario no lo están en media y alta capacidad. En estas baterías el ánodo es de grafito y el cátodo puede ser óxido de cobalto, trifilina (LiFePO_4) u óxido de manganeso.

Sus ventajas son:

- Alta tensión por celda, 4V/celda
- Alta energía, potencia y densidad específicas, debido a la ligereza del material

Y sus desventajas:

- Muy vulnerable a sobrecargas y descargas
- Disponibilidad muy limitada para capacidades medias/altas
- Se necesita un control muy preciso

Se agrupan las características de las anteriores baterías en la tabla 7.

Tipo	Pb-Ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Ni-Fe	Li-Ion
Tensión Nominal (V/celda)	2	1,2	1,2	1,2	4
Energía Específica (Wh/kg)	40	60	90	40	140
Potencia Específica (W/kg)	150-300	80-150	200-300	100	420
Densidad Específica (Wh/l)	80	95	150	30	290
Coste (€/KWh)	120-150	250-350	300-450	-	-
Tiempo Carga (h)	8-16	10-14	2-4	4-8	2-4
Vida (ciclos)	500-600	>1500	>1200	>10000	4000

Tabla 7: Características de las diferentes baterías

5.4.3 Elección de la batería

Acorde con estos datos y considerando que la demanda eléctrica diaria es de unos 5.05KWh, y los picos de potencia alcanzan los 1.2KW, la mejor elección en este caso es la más barata, pues aunque quizá no sea la más efectiva, es la más rentable. Teniendo en cuenta que la batería va a operar en todo momento entre el 20% y el 80% de su capacidad, debería de almacenar 10KWh.

Por lo que se propone el uso de dos baterías de 250kg de Pb-ácido. Las cuales almacenaran un total de 10KWh cada una, considerando un coste de 120€/KWh, sería un importe aproximado de 1200€ cada una. Además podrían soportar picos de potencia de hasta 22.5KW. La elección de estas se debe principalmente a motivos económicos, ya que el uso de otro tipo de batería habría supuesto al menos el doble de coste, por lo que se elige la batería de Pb-ácido, que mediante los reguladores va a aumentar entre dos y tres veces su vida útil.

Es necesario el uso de dos baterías. La razón de ello es que mientras una se carga, la otra está en un uso, con una previsión de funcionamiento de 24 horas. Las baterías se cambian en los periodos del día donde no hay consumo. Y en caso de que la batería no esté cargada lo suficiente debido a la poca velocidad del viento ese día, se cuenta con el generador eléctrico el cual se está usando actualmente para cubrir esos periodos de demanda.

5.5. Cargas de protección

Es un elemento importante dentro del sistema de distribución ya que su función es impedir la destrucción de la batería ante excesos de energía.

La carga de protección actuaría en los casos de viento extremo que pudiesen provocar un exceso de energía que aumentara la corriente máxima permitida por las baterías. Para ello se utiliza un relé, el cual desvíe los excesos a la carga de protección durante estos periodos de tiempo transitorios.

Como carga de protección podrían usarse varios elementos, desde resistencias a motores, pero se elige un banco de resistencias dado su coste inferior.

5.6. Inversor

Es el elemento encargado de cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud deseada. En este caso se utilizaría uno que pasara de 48V de corriente continua a 230V de corriente alterna a 50Hz.

La potencia del mismo debería de soportar los picos eléctricos de consumo, los cuales son de 1.2KW, por lo que se elegiría un inversor de 2KW.

Capítulo 6

Conclusiones y Líneas Futuras

6.1. Conclusiones relativas al diseño y dimensionado del aerogenerador

Para la ejecución del presente PFC ha sido necesaria una investigación previa que permitiera averiguar las condiciones climatológicas en Bangladesh o la demanda eléctrica de los poblados rurales en el sureste asiático. Además ha sido necesario el diseño de equipamiento auxiliar para la turbomáquina que permitiera aumentar el flujo de viento: en otro caso cualquier aerogenerador comercial habría estado infrautilizado ya que la mayoría de los aerogeneradores comerciales del segmento trabajan a plena carga con velocidades de viento cercanas a los 12m/s. El diseño de la tobera, perteneciente al ensamblaje auxiliar, permite aumentar la velocidad del viento entorno a un 50%, lo que permite obtener 3 veces más potencia eléctrica que en condiciones normales, justificando su instalación, la elección del aerogenerador y la demanda eléctrica.

Para aprovechar en mejores condiciones el aerogenerador ha sido necesario instalar el mismo a 30 metros de altura, donde la velocidad del viento aumenta notablemente con respecto a la superficie. Para ello ha sido necesario el diseño de una estructura que alcance esta altura con el menor coste posible, por lo que ha sido diseñada con materiales locales. En este aspecto fue necesaria una investigación acerca de los materiales locales de construcción y las propiedades mecánicas de los mismos, donde se eligieron las especies de bambú: *Dendrocalamus Giganteus* y *Bambusa Bambos*. Donde cabe destacar la ortotropía del bambú, por lo que la estructura fue diseñada con un software capaz de tratar este tipo de condiciones mecánicas.

La unión entre el aerogenerador y la torre fue lograda a través del diseño de varios ensamblajes que tenían como función dar estabilidad al aerogenerador y transmitir adecuadamente los esfuerzos a las barras de la estructura.

Por último se trató el tema de la distribución eléctrica, profundizándose en lo relativo a la selección de las baterías, con la realización de un estado del arte de las disponibles en el mercado actual y dándose indicaciones para la elección de los mismos.

El presente PFC deja algunos puntos abiertos a desarrollos posteriores en los que no se ha profundizado más en detalle por quedar fuera del alcance del mismo:

- En el ámbito de la turbo máquina se podría haber diseñado una tobera más eficiente o haber diseñado un aerogenerador propio con materiales más baratos para reducir costes.
- Respecto a la estructura, se ha conseguido una estructura funcional, aunque se podría optimizar en términos de coste.
- El apartado de la distribución eléctrica se ha abordado de manera simplificada y podría ser objeto de un proyecto completo que lo trataría en mayor profundidad.

6.2. Líneas futuras

En cuanto a las líneas futuras del proyecto queda mucho trabajo por hacer antes de su implantación. El proyecto se ha diseñado de manera preliminar y se ha dimensionado el aerogenerador, pero haría falta el desarrollo del diseño.

Sería posible optimizar la turbomáquina, optimizar la estructura y realizar un diseño completo de la distribución eléctrica. Con estas líneas futuras se podría desarrollar e implantar un aerogenerador que ayudara a la evolución de una sociedad subdesarrollada que aumentara su calidad de vida de una manera sostenible.

Este proyecto surgió como una parte de un proyecto mayor, en actual ejecución, por la Universidad de Linköping, donde se está desarrollando el aerogenerador completo para su futura implantación en países asiáticos. Este proyecto destaca por que todos los componentes son de diseño original diseñados por investigadores de la universidad, y donde prima el coste como principal característica.

6.3. Conclusiones personales

Una vez realizado el proyecto se pueden sacar varias conclusiones del mismo. Este ha sido un trabajo de varios meses en los cuales he aprendido muchas cosas, no solo a nivel académico adquiriendo nuevos conocimientos técnicos relacionados con el proyecto, si no también determinados conceptos de carácter organizativo que engloban al proyecto entero.

Dados los diferentes ámbitos de estudio que engloban este proyecto, ha sido necesario un reaprendizaje de los mismos: esta ha sido una de las características principales del proyecto. La amplitud de los ámbitos tratados ha limitado, como no podría ser de otra forma, el alcance de cada actividad.

También quisiera resaltar las evoluciones acontecidas dentro del mismo, o como se pasa de una idea previa a un concepto y resultado completamente distinto y probablemente impensable unos meses atrás. Así como me gustaría mencionar el trabajo que no se ve, el trabajo que lleva a puntos muertos, a simulaciones erróneas, en definitiva al fracaso, pero en nuestra mano está convertir este fallo en un logro, en definitiva pasar del fracaso al éxito.

Apéndice **A**

Diferentes Aerogeneradores Comerciales

A.1. Introducción

En la actualidad es posible encontrar multitud de aerogeneradores comerciales de baja potencia debido a la población que prefiere generar su propia electricidad antes que comprarla. En este proyecto es necesario realizar un estudio acerca de los diferentes aerogeneradores disponibles en el mercado internacional para así poder elegir el óptimo para las necesidades dadas.

Se estudian las características de 13 aerogeneradores que cumplen con las necesidades acordadas en el capítulo 3:

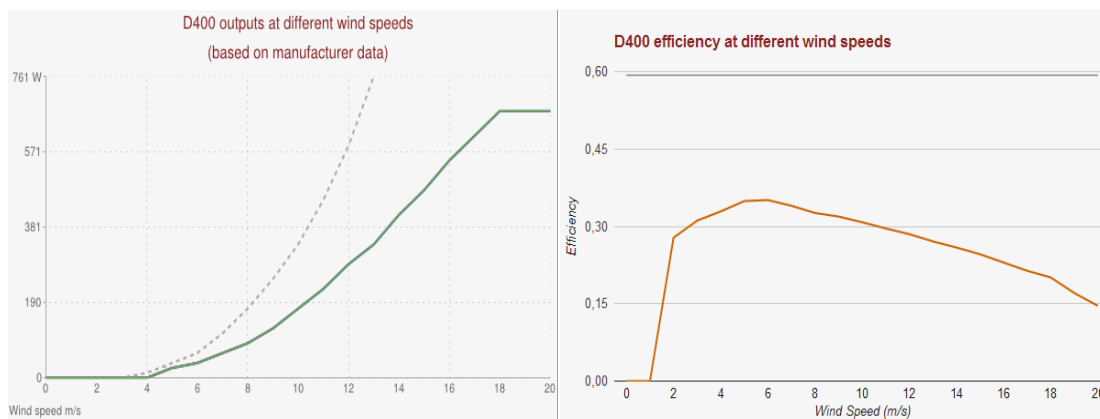
- Diámetro inferior a 2.5m
- Potencia nominal comprendida entre 600W y 1.5KW

A.2. Stealthgen D400 Wind Turbine



Figura A.1: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	5
Potencia Nominal	400W
Diámetro del Rotor	1.1m
Área Barrida	0.95m ²
Potencia con viento de 5m/s	25.5W
Eficiencia con viento de 5m/s	34.9%
Coste	1120€
Voltajes Proporcionados	12V, 24V, 48V, 72V



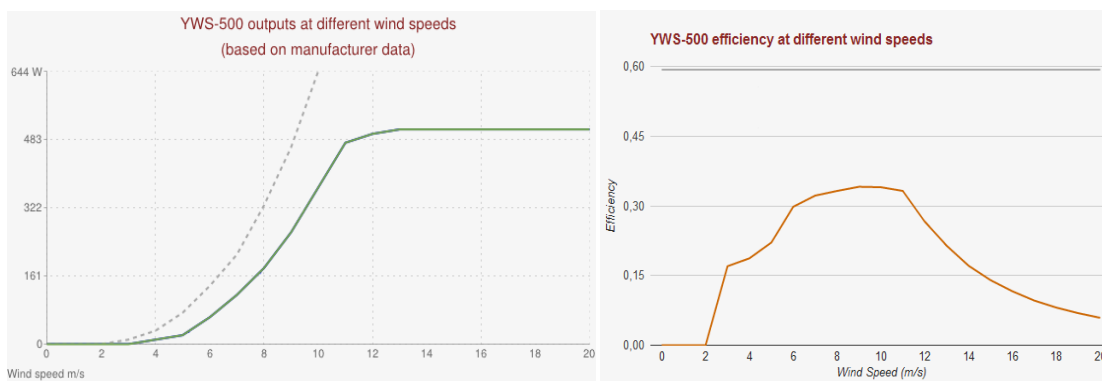
Figuras A.2 y A.3: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.3. YWS-500 Wind Luce Wind Turbine



Figura A.4: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	500W
Diámetro del Rotor	1.5m
Área Barrida	1.77m^2
Potencia con viento de 5m/s	30W
Eficiencia con viento de 5m/s	22.08%
Coste	desconocido
Voltajes Proporcionados	24V



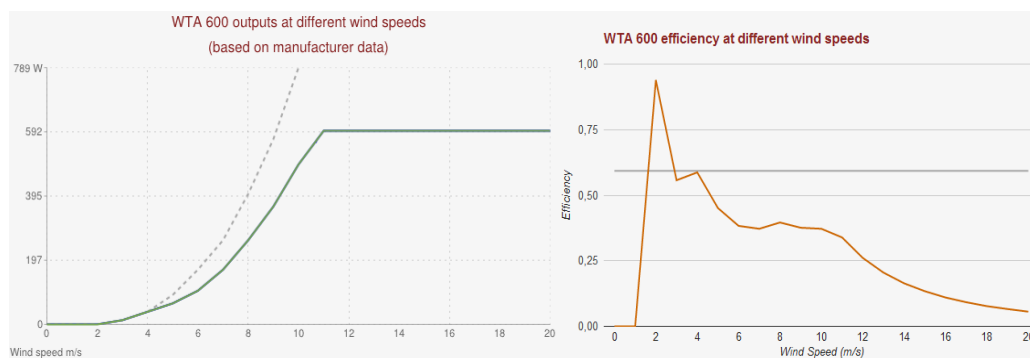
Figuras A.5 y A.6: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.4. Wind Turbines Australia 600W



Figura A.7: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	600W
Diámetro del Rotor	1.66m
Área Barrida	2.16m ²
Potencia con viento de 5m/s	75W
Eficiencia con viento de 5m/s	45.08%
Coste	870€
Voltajes Proporcionados	12V, 24V, 48V



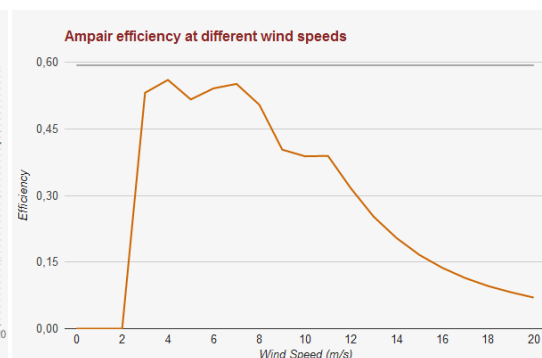
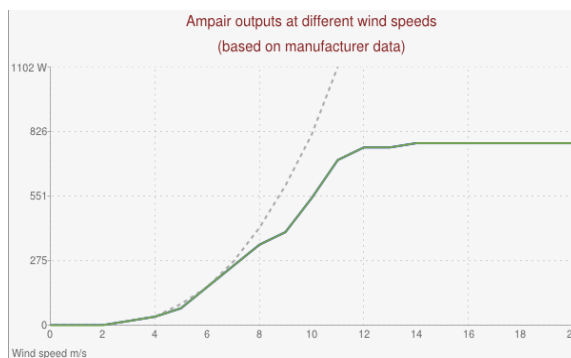
Figuras A.8 y A.9: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.5. Ampair 600 Wind Turbine



Figura A.10: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	600W
Diámetro del Rotor	1.7m
Área Barrida	2.27m ²
Potencia con viento de 5m/s	90W
Eficiencia con viento de 5m/s	51.58%
Coste	1860€
Voltajes Proporcionados	24V, 48V



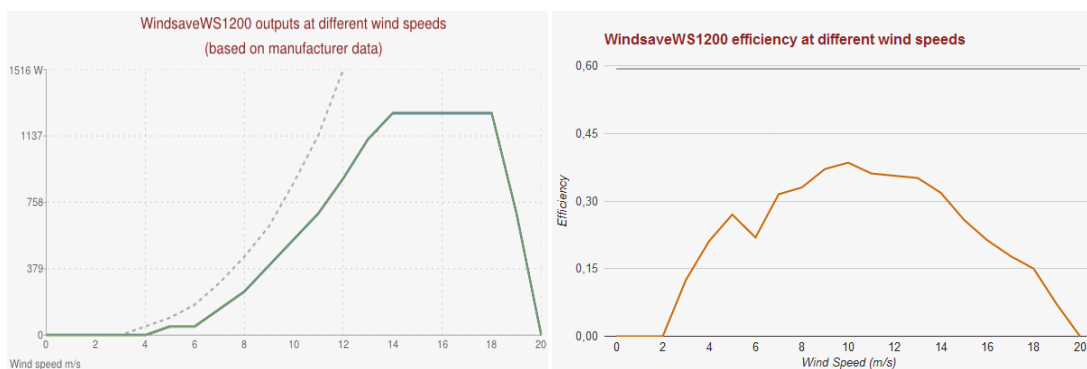
Figuras A.11 y A.12: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.6. Windsave WS1200 Wind Turbine



Figura A.13: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	1200W
Diámetro del Rotor	1.75m
Área Barrida	2.41m ²
Potencia con viento de 5m/s	50W
Eficiencia con viento de 5m/s	27.04%
Coste	1860€
Voltajes Proporcionados	240V AC



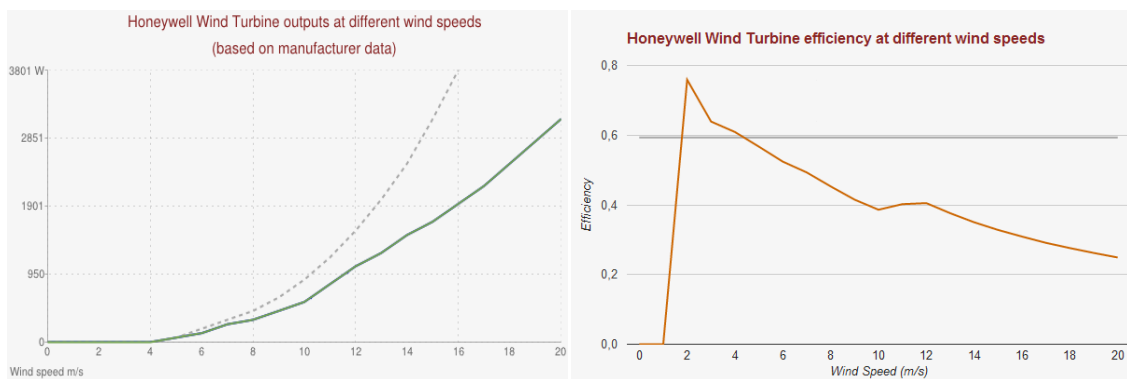
Figuras A.14 y A.15: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.7. Honeywell WT6500 Wind Turbine



Figura A.16: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	10
Potencia Nominal	-
Diámetro del Rotor	1.8m
Área Barrida	2.54m ²
Potencia con viento de 5m/s	111W
Eficiencia con viento de 5m/s	56.74%
Coste	4750€
Voltajes Proporcionados	120V, 240V AC



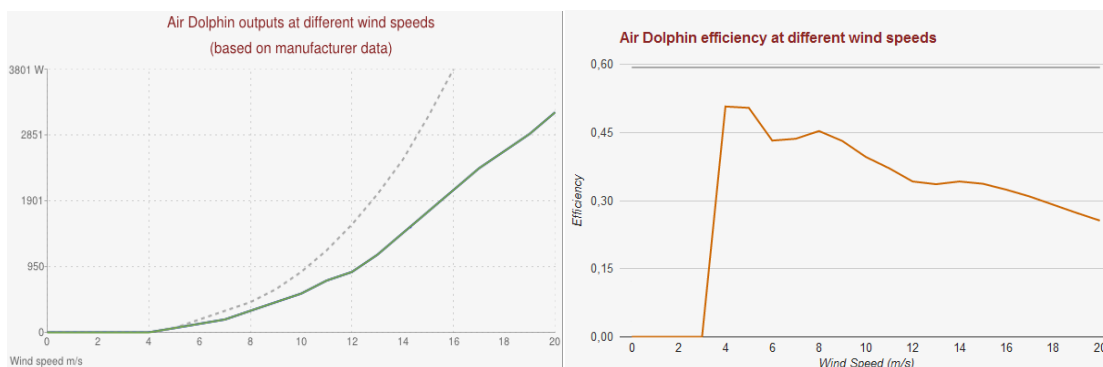
Figuras A.17 y A.18: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.8. Air Dolphin 1kW Wind Turbine



Figura A.19: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	1KW
Diámetro del Rotor	1.8m
Área Barrida	2.54m ²
Potencia con viento de 5m/s	100W
Eficiencia con viento de 5m/s	50.35%
Coste	7450€
Voltajes Proporcionados	24V



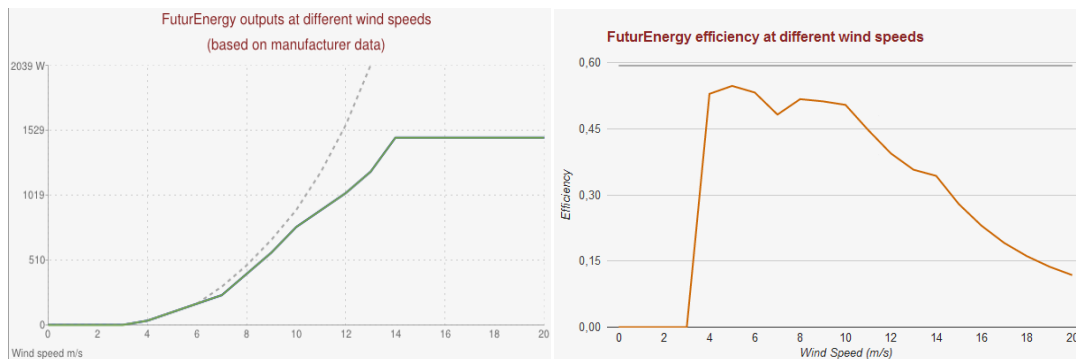
Figuras A.20 y A.21: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.9. FuturEnergy 1kW Wind Turbine



Figura A.22: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	5
Potencia Nominal	1KW
Diámetro del Rotor	1.8m
Área Barrida	2.54m ²
Potencia con viento de 5m/s	107W
Eficiencia con viento de 5m/s	54.7%
Coste	1100€
Voltajes Proporcionados	12V, 24V, 48V



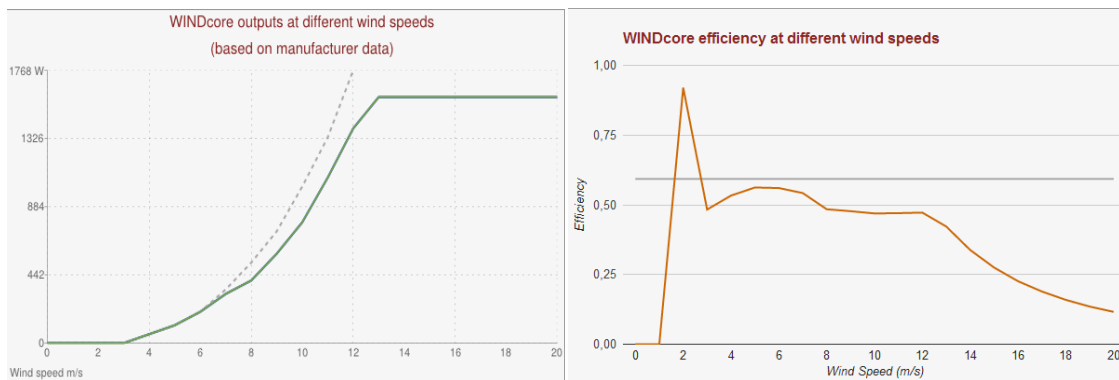
Figuras A.23 y A.24: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.10. WINDCore 1500



Figura A.25: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	5
Potencia Nominal	1500W
Diámetro del Rotor	1.89m
Área Barrida	2.81m^2
Potencia con viento de 5m/s	121.3W
Eficiencia con viento de 5m/s	56.24%
Coste	desconocido
Voltajes Proporcionados	desconocido



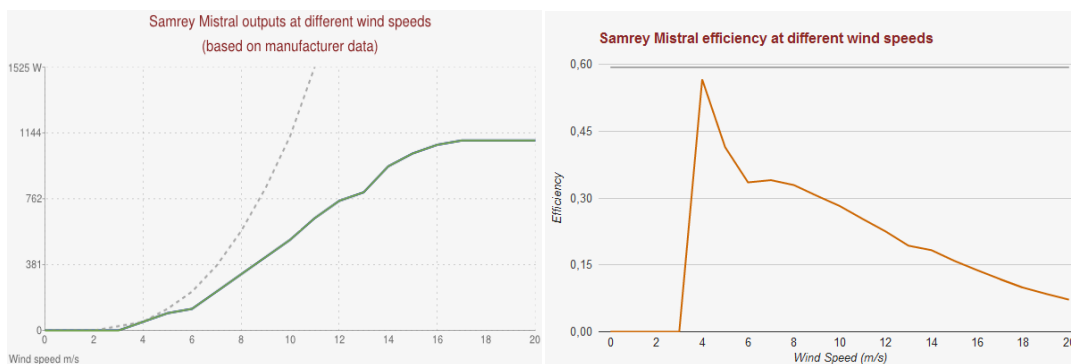
Figuras A.26 y A.27: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.11. Samrey Mistral Wind Turbine



Figura A.28: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	1100W
Diámetro del Rotor	2m
Área Barrida	3.14m^2
Potencia con viento de 5m/s	100W
Eficiencia con viento de 5m/s	41.41%
Coste	1050€
Voltajes Proporcionados	24V, 48V



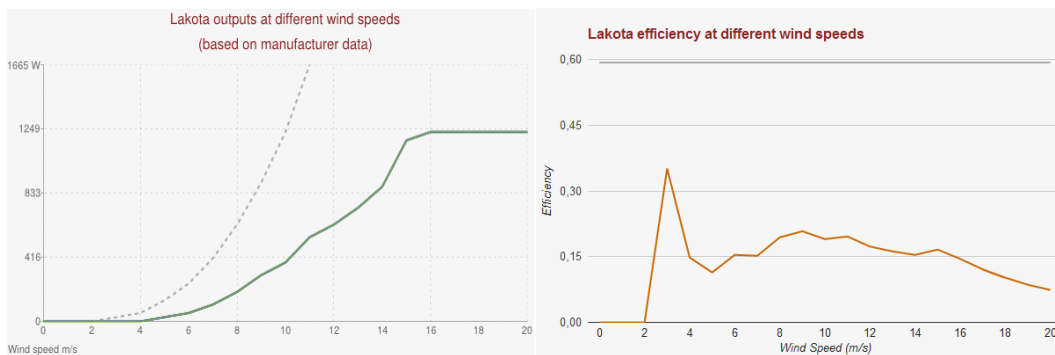
Figuras A.29 y A.30: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.12. Aerodyne Lakota Wind Turbine



Figura A.31: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	1200W
Diámetro del Rotor	2.09m
Área Barrida	3.43m ²
Potencia con viento de 5m/s	30W
Eficiencia con viento de 5m/s	11.38%
Coste	1250€
Voltajes Proporcionados	12V, 24V, 48V



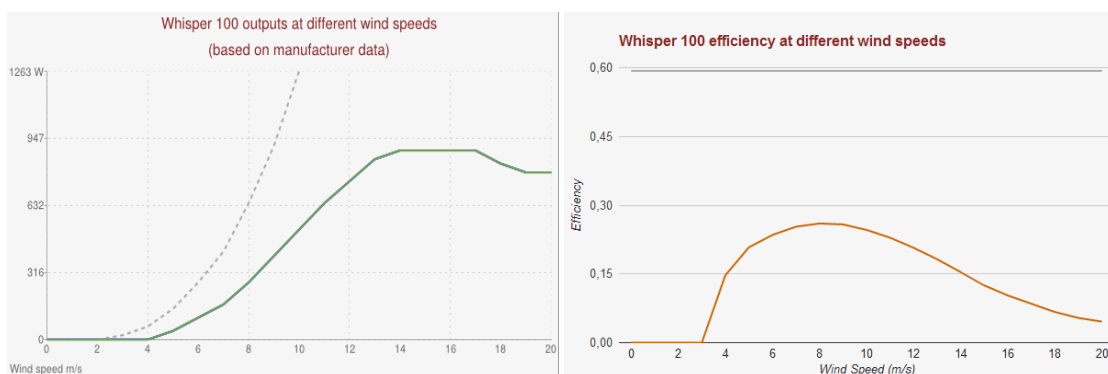
Figuras A.32 y A.33: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.13. Whisper 100 Wind Turbine



Figura A.34: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	900W
Diámetro del Rotor	2.1m
Área Barrida	3.46m^2
Potencia con viento de 5m/s	55.42W
Eficiencia con viento de 5m/s	20.81%
Coste	desconocido
Voltajes Proporcionados	12V, 24V, 48V



Figuras A.35 y A.36: Curva de Potencia y de Eficiencia del aerogenerador [15]

A.14. Antaris 1,7kW Wind Turbine



Figura A.37: Imagen del aerogenerador [15]

Número de Palas	3
Potencia Nominal	1500W
Diámetro del Rotor	2.35m
Área Barrida	4.34m ²
Potencia con viento de 5m/s	150W
Eficiencia con viento de 5m/s	45%
Coste	desconocido
Voltajes Proporcionados	24V, 48V, 350V AC

Apéndice **B**

Dimensionado Ensamblaje Superior

B.1. Dimensionado viga soporte de tobera

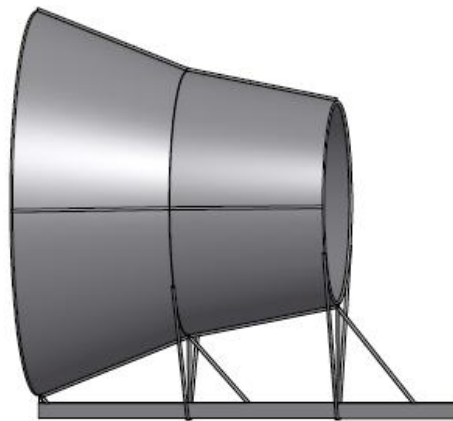


Figura B.1: Conjunto Tobera

B.1.1. Material y sección de la viga

Viga de acero de 4.2 metros de longitud

Viga de sección rectangular (150x100) con espesor de 6mm

B.1.2. Restricciones

Viga empotrada en sus últimos 20cm

B.1.3. Cargas

Se distribuyen las cargas según su punto de aplicación

- Punto 1.
Distancia de aplicación: 4m
Carga: 29.561kg
- Punto 2.
Distancia de aplicación: 2.5m
Carga: 40.39kg
- Punto 3.
Distancia de aplicación: 2.225m
Carga: 1.06kg
- Punto 4.
Distancia de aplicación: 1m
Carga: 24.34kg
- Punto 5.
Distancia de aplicación: 0.635m
Carga: 1.46kg

B.1.4. Resultados

Se realiza el análisis estructural de la barra con el modulo de Análisis de Estructura del software Autodesk Inventor Professional, del que se obtienen los siguientes resultados.

Son unos resultados coherentes y proporcionan estabilidad al sistema, ahora la siguiente tarea es diseñar un conjunto veleta que contrarreste el momento generado por este conjunto en el eje central.

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0mm	9.46 mm
Fuerzas	Fx	0 N	0 N
	Fy	-1829.9 N	-295.6 N
	Fz	0 N	0 N
Momentos	Mx	-4192012.8 N mm	0 N mm
	My	0 N mm	0 N mm
	Mz	0 N mm	0 N mm
Tensiones normales	Smax	0 MPa	36.9 MPa
	Smin	-36.9 MPa	0 MPa
	Smax(Mx)	0 MPa	36.9 MPa
	Smin(Mx)	-36.9 MPa	0 MPa
	Smax(My)	0 MPa	0 MPa
	Smin(My)	0 MPa	0 MPa
	Saxial	0 MPa	0 MPa
Tensión de corte	Tx	0 MPa	0 MPa
	Ty	0.2 MPa	1.2 MPa
Tensiones de torsión	T	0 MPa	0 MPa

Tabla B.1

B.2. Dimensionado viga soporte de veleta

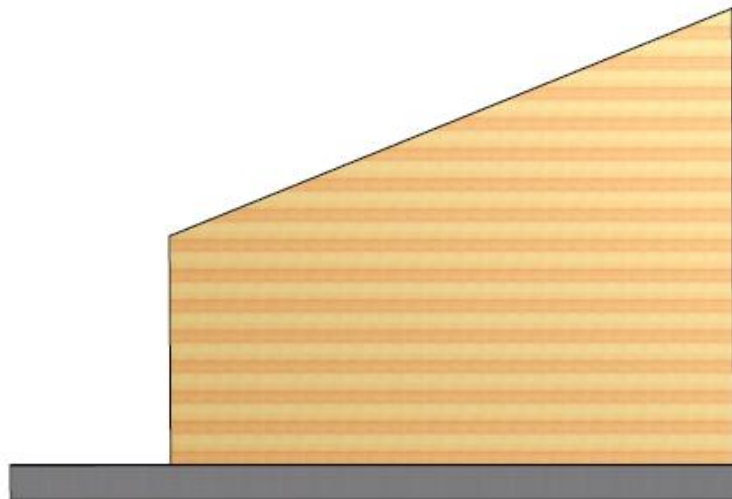


Figura B.2: Conjunto Veleta

B.2.1. Material y sección de la viga

Viga de acero de 3.2 metros de longitud

Viga de sección rectangular (150x100) con espesor de 6mm

B.2.2. Restricciones

Viga empotrada en sus últimos 20cm

B.2.3. Cargas

Se distribuyen las cargas según su punto de aplicación

- Punto 1.
Distancia de aplicación: 3m
Carga: 16.77kg
- Punto 2.
Distancia de aplicación: 2.5m
Carga: 5.85kg
- Punto 3.
Distancia de aplicación: 1,9m
Carga: 66.83kg
- Punto 4.
Distancia de aplicación: 1. 5m
Carga: 3.9kg

B.2.4. Resultados

Se realiza el análisis estructural de la barra con el modulo de Análisis de Estructura del software Autodesk Inventor Professional, del que se obtienen los siguientes resultados.

Los resultados proporcionan estabilidad en la barra y equiparan el momento resultante en el eje central.

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0 mm	5.2 mm
Fuerzas	Fx	0 N	0 N
	Fy	-2242.5 N	-167.7 N
	Fz	0 N	0 N
Momentos	Mx	-4191600 N mm	0 N mm
	My	0 N mm	0 N mm
	Mz	0 N mm	0 N mm
Tensiones normales	Smax	0 MPa	36.9 MPa
	Smin	-36.9 MPa	-0 MPa
	Smax(Mx)	0 MPa	36.9 MPa
	Smin(Mx)	-36.9 MPa	-0 MPa
	Smax(My)	0 MPa	0 MPa
	Smin(My)	0 MPa	0 MPa
	Saxial	0 MPa	0 MPa
Tensión de corte	Tx	0 MPa	0 MPa
	Ty	0.1 MPa	1.5 MPa
Tensiones de torsión	T	0 MPa	0 MPa

Tabla B.2

Apéndice C

Análisis de flujo en la tobera

C.1. Análisis de flujo

Para la obtención de los datos de velocidad a la salida de la tobera es necesario usar el modulo de CFD de ANSYS, el cual permite el análisis de fluidos.

Para ello se diseña la geometría de la tobera y se considera un cuerpo solido en el interior de un flujo en movimiento, en este caso aire a diferentes velocidades. De los cuales obtenemos el flujo de aire en todo el dominio, representado en la figura C.1. El modelo se incluye en el interior de una especie de túnel del viento de 20 metros de longitud y 28 metros de diámetro para asemejarlo lo más posible al ambiente.

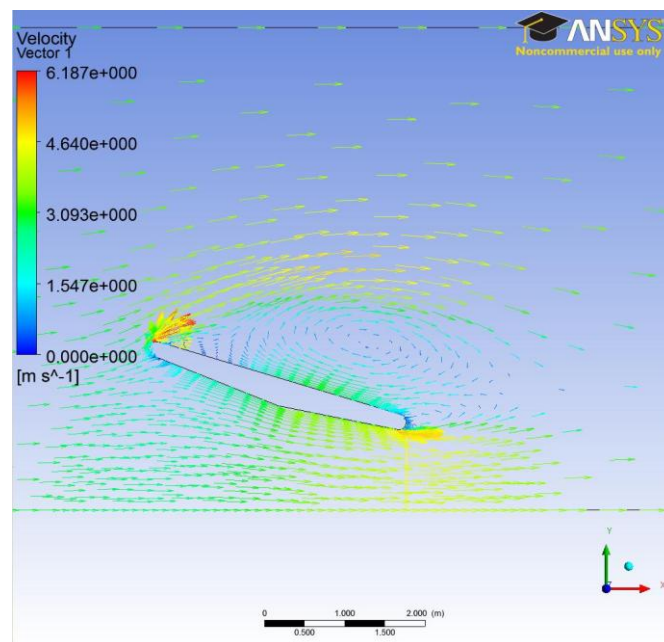


Figura C.1. Distribución del flujo de viento en todo el dominio

C.2. Distribución en coordenada

El software permite observar la distribución de velocidades en cualquier línea de coordenadas del dominio, para lo que observamos la velocidad a la salida de la tobera. En este caso la figura C.2 muestra la velocidad a la salida cuando la velocidad de entrada a la tobera es de 3m/s.

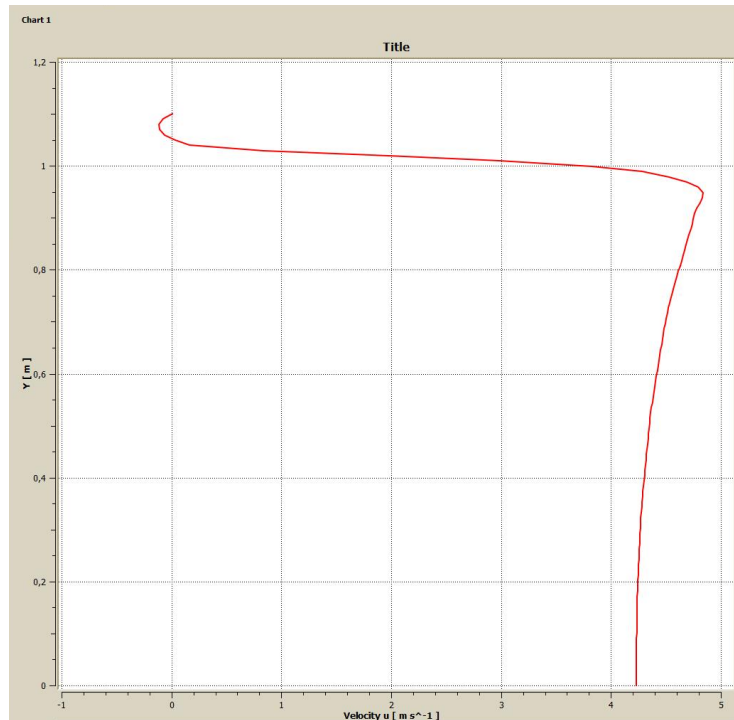


Figura C.2: Distribución de velocidades en línea de coordenadas

C.3. Resultados

Quedando la distribución de todo el dominio de velocidades a la salida de la tobera como:

Vel. Entrada (m/s)	Vel. Salida (m/s)
0	0
0.5	0.6
1	1.2
1.5	1.9
2	2.5
2.5	3.5
3	4.3
3.5	5.3
4	6.2
4.5	7.1
5	7.8
5.5	8.7
6	9.5
6.5	10.3
7	10.8
7.5	11.7
8	12.5
8.5	13.3
9	14.2

Tabla C.1

Apéndice **D**

Análisis de la torre

D.1. Análisis estructural

En este anexo se muestran los resultados del análisis de estructura para las diferentes configuraciones de torre usada, en función de los dos casos de trabajo.

D.1.1. Torre de bambú con sección cuadrada antes condiciones normales

D.1.1.1. Material y sección de la viga

Todas las barras de la estructura son cañas de bambú, distinguiendo dos especies diferentes: *Dendrocalamus Giganteus* para los postes verticales; y *Bambusa Bambos* para el resto de barras. Las secciones son las siguientes:

- *Dendrocalamus Giganteus*: diámetro 200mm y espesor 20mm
- *Bambusa Bambos*: diámetro 170mm y espesor 30mm

D.1.1.2. Restricciones

Todos los apoyos inferiores de las barras verticales están empotrados

D.1.1.3. Cargas

- Viento de 6m/s a lo largo de toda la cara lateral de la estructura
- 700kg apoyados en la parte superior de la estructura

D.1.1.4. Resultados

Se realiza el análisis estructural de la torre con el software ANSYS MECHANICAL del que se obtienen los siguientes resultados.

- Desplazamiento máximo: 1.92 mm
- Tensión máxima tracción: 0.36 MPa
- Tensión máxima compresión: 0.88 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 0.88 MPa

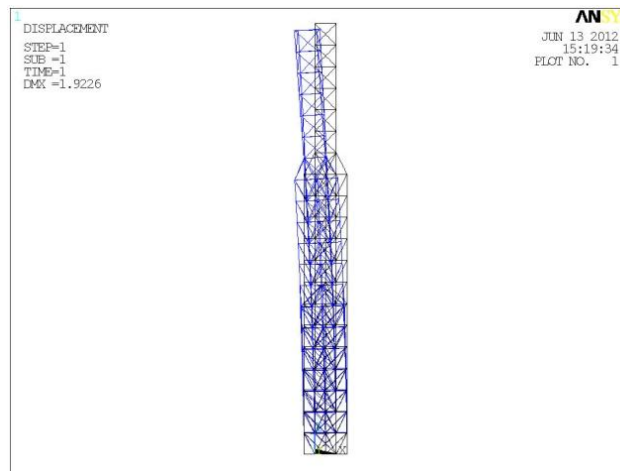


Figura D.1: Desplazamiento lateral de la torre

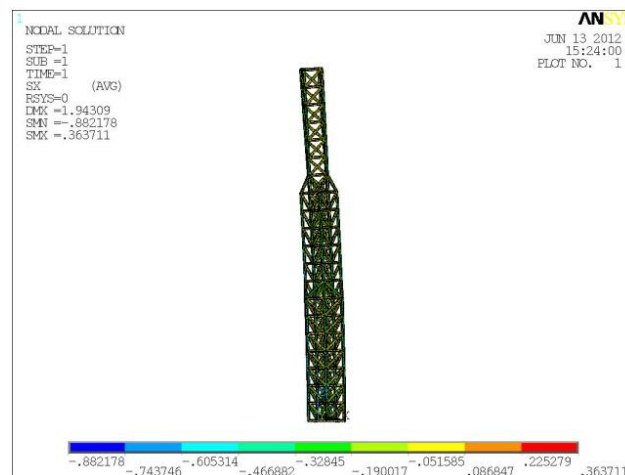


Figura D.2: Tensiones de tracción y compresión en la torre

D.1.2. Torre de bambú con sección cuadrada antes condiciones extremas

D.1.2.1. Material y sección de la viga

Todas las barras de la estructura son cañas de bambú, distinguiendo dos especies diferentes: Dendrocalamus Giganteus para los postes verticales; y Bambusa Bambos para el resto de barras. Las secciones son las siguientes:

- Dendrocalamus Giganteus: diámetro 200mm y espesor 20mm
- Bambusa Bambos: diámetro 170mm y espesor 30mm

D.1.2.2. Restricciones

Todos los apoyos inferiores de las barras verticales están empotrados

D.1.2.3. Cargas

- Viento de 30m/s a lo largo de toda la cara lateral de la estructura

D.1.2.4. Resultados

Se realiza el análisis estructural de la torre con el software ANSYS MECHANICAL del que se obtienen los siguientes resultados.

- Desplazamiento máximo: 42.59 mm
- Tensión máxima tracción: 3.82 MPa
- Tensión máxima compresión: 4.72 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 4.72 MPa

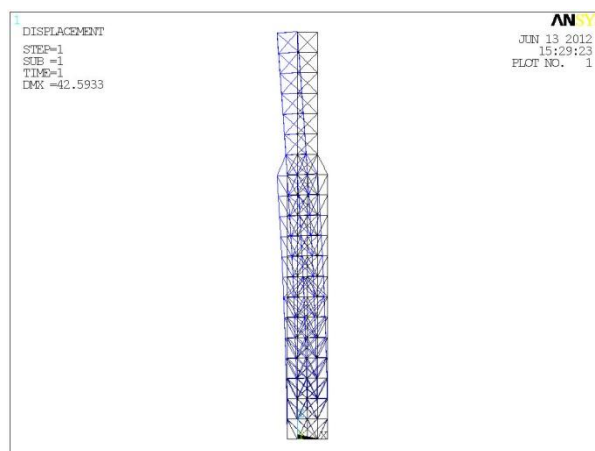


Figura D.3: Desplazamiento lateral de la torre

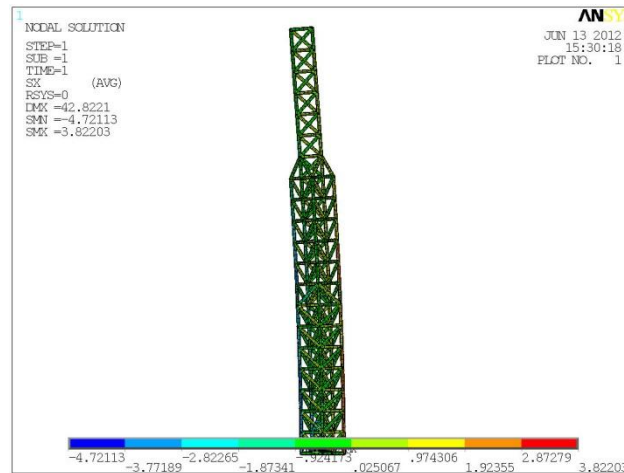


Figura D.4: Tensiones de tracción y compresión en la torre

D.1.3. Torre de bambú con sección triangular antes condiciones normales

D.1.3.1. Material y sección de la viga

Todas las barras de la estructura son cañas de bambú, distinguiendo dos especies diferentes: *Dendrocalamus Giganteus* para los postes verticales; y *Bambusa Bambos* para el resto de barras. Las secciones son las siguientes:

- *Dendrocalamus Giganteus*: diámetro 200mm y espesor 20mm
- *Bambusa Bambos*: diámetro 170mm y espesor 30mm

D.1.3.2. Restricciones

Todos los apoyos inferiores de las barras verticales están empotrados

D.1.3.3. Cargas

- Viento de 6m/s a lo largo de toda la cara lateral de la estructura
- 700kg apoyados en la parte superior de la estructura

D.1.3.4. Resultados

Se realiza el análisis estructural de la torre con el software ANSYS MECHANICAL del que se obtienen los siguientes resultados.

- Desplazamiento máximo: 3.5 mm
- Tensión máxima tracción: 0.44 MPa
- Tensión máxima compresión: 0.99 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 0.99 MPa

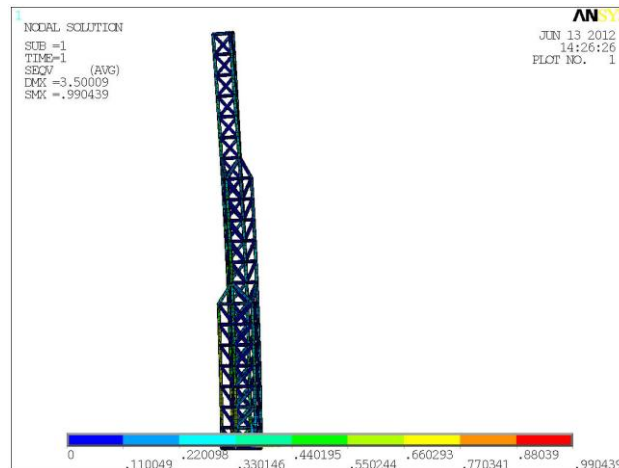


Figura D.5: Tensión de Von Mises

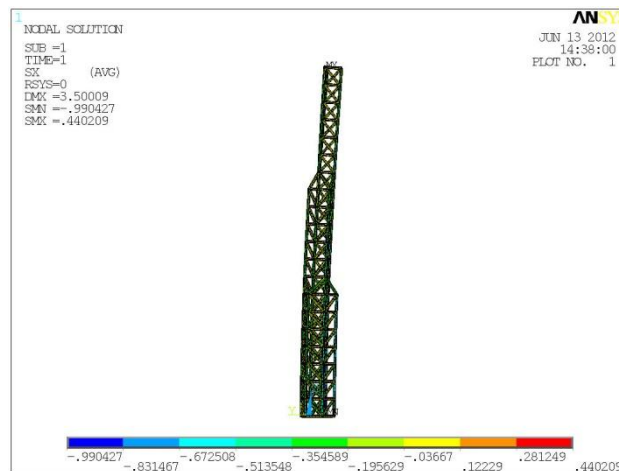


Figura D.6: Tensiones de tracción y compresión en la torre

D.1.3. Torre de bambú con sección triangular antes condiciones extremas

D.1.3.1. Material y sección de la viga

Todas las barras de la estructura son cañas de bambú, distinguiendo dos especies diferentes: *Dendrocalamus Giganteus* para los postes verticales; y *Bambusa Bambos* para el resto de barras. Las secciones son las siguientes:

- *Dendrocalamus Giganteus*: diámetro 200mm y espesor 20mm
- *Bambusa Bambos*: diámetro 170mm y espesor 30mm

D.1.3.2. Restricciones

Todos los apoyos inferiores de las barras verticales están empotrados

D.1.3.3. Cargas

- Viento de 30m/s a lo largo de toda la cara lateral de la estructura

D.1.3.4. Resultados

Se realiza el análisis estructural de la torre con el software ANSYS MECHANICAL del que se obtienen los siguientes resultados.

- Desplazamiento máximo: 3.5 mm
- Tensión máxima tracción: 0.44 MPa
- Tensión máxima compresión: 0.99 MPa
- Tensión máxima Von Mises: 0.99 MPa

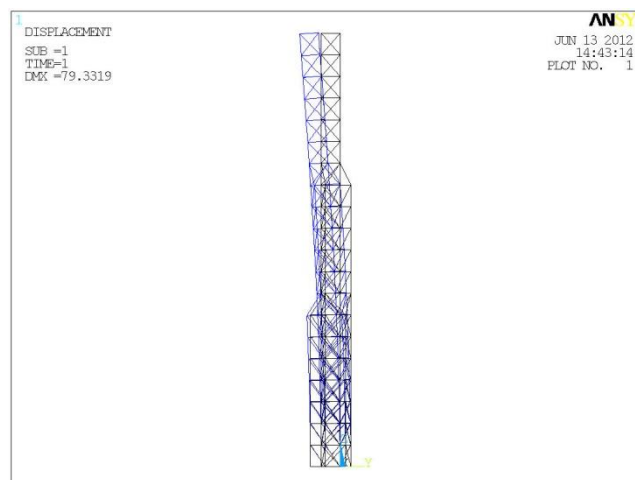


Figura D.7: Tensión de Von Mises

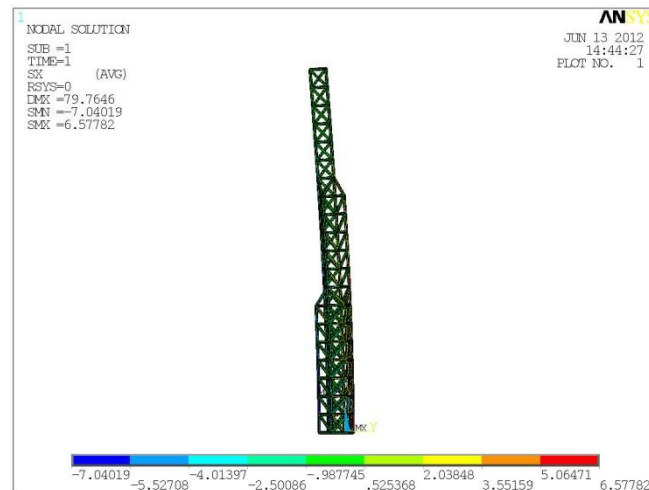


Figura D.8: Tensiones de tracción y compresión en la torre

D.2. Análisis de material

D.2.1. Torre sección cuadrada

La torre de bambú con sección cuadrada puede tener diferentes anchuras entre sus postes interiores, en función de esto, para mantener la celosía, la torre tendrá una altura u otra, usando siempre la más cercana a 30m.

Anchura entre postes interiores	Cantidad usada de bambú en metros
1 m	1045 m
1.25 m	1045 m
1.5 m	1047 m
1.75 m	1073 m
2 m	1045 m
2.25 m	1070 m

La configuración deseada es la de 1.5m de anchura dado que combina unas buenas propiedades con una estructura no demasiado ancha en general.

D.2.1. Torre sección triangular

En contrapunto y como alternativa, calculamos la cantidad de material de una torre de bambú con sección triangular con un ancho entre postes de 1.5m, sabiendo que la cantidad de material entre las diferentes configuraciones de sección triangular son similares, y obtenemos una cantidad total de 756m de caña de bambú, un 27.6% menos de bambú que en el caso de la estructura con sección cuadrada.

Apéndice **E**

Análisis de la unión superior

E.1. Análisis estructural de los brazos

Análisis estructural de los brazos extensibles del ensamblaje superior para averiguar si estos son capaces de soportar la fuerza ejercida sobre ellos.



Figura E.1: Sección del ensamblaje superior

E.1.1. Material y sección de la viga

Se trata de brazos extensibles de acero, formados por dos brazos macho de sección circular de 30mm de diámetro y un brazo hembra con 50mm de diámetro y 10mm de espesor.

E.1.2. Restricciones

Se consideran los apoyos de los brazos en las barras de bambú como apoyos.

E.1.3. Cargas

700kg a repartir entre los 6 brazos. Se supone el caso más desfavorable para el brazo, el caso en el que el brazo superior estuviera completamente horizontal y cayera todo el peso sobre los brazos inferiores. En ese caso los brazos inferiores formarían un ángulo de 20° con el eje vertical.

E.1.4. Resultados

Tensión Componente Macho = 1.75MPa

Tensión Componente Hembra = 0.98MPa

Son unos datos de tensión perfectamente sostenibles por el brazo de acero.

E.2. Análisis estructural de las cañas de bambú

E.2.1. Material y sección de la viga

Son cañas de bambú Bambusa Bambos, con un diámetro de 170mm y espesor de 30mm.

E.1.2. Restricciones

Los extremos de la caña se consideran empotrados

E.1.3. Cargas

Se aplican dos cargas de 1500N en la parte central de la caña con un ángulo de 20° respecto del eje vertical, tal como la transmitirían los brazos en el caso más desfavorable.

E.1.4. Resultados

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0mm	0.4 mm
Fuerzas	Fx	-1520.4 N	1520.4 N
	Fy	-388.2 N	388.2 N
	Fz	0 N	0 N
Momentos	Mx	-126821.3 N mm	144938.6 N mm
	My	-1041064.1 N mm	0 N mm
	Mz	0 N mm	0N mm
Tensiones normales	Smax	0.3 MPa	2.9 MPa
	Smin	-2.9 MPa	-03 MPa
	Smax(Mx)	0.01 MPa	0.3 MPa
	Smin(Mx)	-0.3 MPa	-0.01 MPa
	Smax(My)	0 MPa	2.6 MPa
	Smin(My)	-2.6 MPa	-0 MPa
	Saxial	0 MPa	0 MPa
Tensión de corte	Tx	-0.2 MPa	0.2 MPa
	Ty	-0.05 MPa	0.05 MPa
Tensiones de torsión	T	0 MPa	0 MPa

Por lo que la caña es capaz de soportar los esfuerzos realizados.

Apéndice **F**

Elección del rodamiento

F.1. Elección del rodamiento

Se decide el uso de un rodamiento axial de rodillos cilíndricos porque es un rodamiento que absorbe fuerzas elevadas en la dirección axial y permiten el giro.

Elegimos el siguiente rodamiento del catalogo de SKF, el cual tiene las siguientes dimensiones y propiedades:

- Diámetro exterior: 110mm
- Diámetro interior: 85mm
- Altura: 19mm
- Capacidad de carga estática: 365kN
- Capacidad de carga dinámica: 88kN

Este rodamiento soportará perfectamente las cargas que actuarán sobre él.

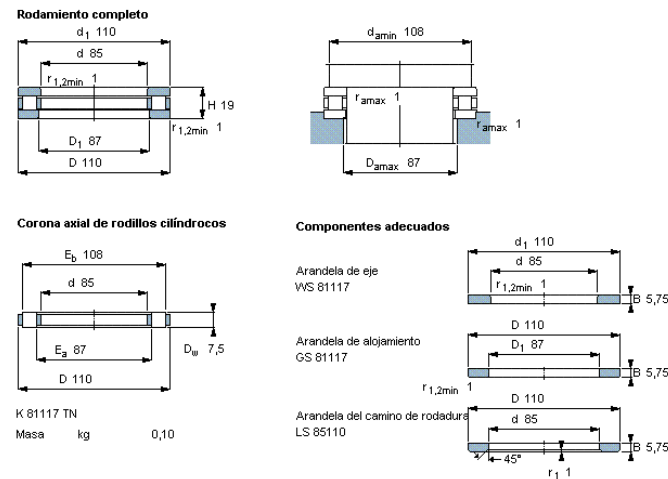


Figura F.1: Dimensiones del rodamiento [17]

Referencias

[1] Wind Turbines. Erich Hau

[2] Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. ASME Press. New York, 1994.

[3] Wind resource assessment for southern part of Bangladesh. M. N. Hoque, S. K. Nandi, H. R. Ghosh. 2010.

[4] Mechanical Properties of Bamboo.

file:///D:/www.bambus/new/eng/reports/mechanical_properties/referat2.html

[5] Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. K. F. Chung, W. K. Yu. March 2001

[6] <http://www.futureenergy.co.uk/turbine.html>

[7] Wikipedia/Bambusoideae

[8] Bamboo Construction Technology for Housing in Bangladesh. Shila K. de Vries, February 2002.

[9] Modelling of a Bangladeshi Rural Hut for Wind Tunnel Test. M. A. Ansary, S. M. Seraj, U. K. Roy. February 1999.

[10] Mechanical Properties of Bamboo

file:///D:/www.bambus/new/eng/reports/mechanical_properties/referat2.html

[11] Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. K. F. Chung, W. K. Yu. March 2001.

[12] Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. ASME Press. New York, 1994.

[13] PHYSICAL, CHEMICAL, AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO AND ITS UTILIZATION POTENTIAL FOR FIBERBOARD MANUFACTURING. Xiaobo Li

[14] La forma de la torre Eiffel. Joseph Gallant. Febrero 2002.

[15] http://www.bettergeneration.co.uk/wind-turbine-reviews.html?limit=50&order=jr_bladediameter

[16] Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos. Juan Carlos Viera Pérez.

[17] http://www.skf.com/portal/skf_es/home