

Resumen

Este proyecto se enmarca en un convenio de colaboración entre ITDG (Intermediate Technologies Development Group) y la UPC. El objetivo de este proyecto es la introducción en la UPC de conocimientos acerca del funcionamiento y composición de un aerogenerador de baja potencia (IT-100), y la determinación de los aspectos más relevantes a desarrollar en futuros estudios de continuidad del presente proyecto, que permitan optimizar el funcionamiento de este tipo de mecanismos.

Para contribuir a la ampliación de conocimientos se ha estudiado el comportamiento mecánico y eléctrico del aerogenerador. El estudio mecánico se basa fundamentalmente en el análisis del funcionamiento del sistema de protección del aerogenerador en función del viento y de los parámetros dimensionales del mecanismo, mientras que el estudio eléctrico consiste en la determinación teórica de la potencia eléctrica entregada en función de la velocidad del viento.

Se incluye un manual completamente detallado de construcción manufacturada del aerogenerador. Este enfoque constructivo se plasma también en un listado preciso de todos los materiales necesarios para la construcción y montaje de los diferentes elementos que componen el aerogenerador, así como un listado completo de los materiales necesarios para manufacturar los moldes y plantillas que requiere la construcción del aerogenerador descrito. Además se ha incluido un estudio del coste económico y un estudio del coste energético derivado de la construcción íntegra del aerogenerador, que permite analizar más objetivamente la viabilidad de construir más aerogeneradores de este tipo en el futuro.

Tras los estudios realizados, se puede afirmar que el coste económico de construcción casera (sin tener en cuenta la mano de obra) del aerogenerador es bajo, y a nivel energético, es viable, ya que en un periodo muy reducido, en comparación a la vida útil del aerogenerador, se recupera la energía consumida en la construcción, emplazando el aerogenerador en una zona de vientos bajos.





Sumario

SUMARIO	3
1. INTRODUCCIÓN	7
2. ANTECEDENTES	9
2.1. Dificultades de acceso a la energía	9
2.1.1. Precio de la electricidad	11
2.1.2. Alternativas energéticas	11
2.1.3. Dependencia de la biomasa	12
2.2. El papel de la energía	14
2.2.1. En el desarrollo	14
2.2.2. La lista de objetivos del milenio de la ONU para el 2015	16
2.2.3. Importancia de la energía en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo del milenio de la ONU	19
2.2.4. Papel específico de la energía eléctrica en ambos aspectos	22
2.3. La alternativa de la eólica de baja potencia	22
2.3.1. Uso del aerogenerador de baja potencia	24
2.3.2. Ejemplos de uso del aerogenerador de baja potencia	26
3. DESCRIPCIÓN DEL AEROGENERADOR	31
3.1. El generador de imanes permanentes (PMG)	32
3.1.1. Estator	33
3.1.2. Rotores magnéticos	33
3.1.3. El buje	35
3.1.4. El eje	36
3.1.5. El montaje eléctrico	36
3.2. El rotor eólico	40
3.2.1. Introducción	40
3.2.2. Rotor eólico del IT-100	43
3.2.3. Las palas	43
3.2.4. Los discos del rotor	46
3.3. La montura del aerogenerador	47
3.3.1. Montura del buje	48
3.3.2. Soportes del estator	49
3.3.3. Tubo de viraje	49
3.3.4. Parte interna de la bisagra de la cola	50
3.4. Cola del aerogenerador	50
3.4.1. Cola	50
3.4.2. Veleta	51



3.5.	La estructura (torre)	52
3.6.	Ensamblaje del conjunto mecánico	53
4.	MATERIALES Y PESO DEL AEROGENERADOR	55
5.	ESTUDIO ELÉCTRICO DEL AEROGENERADOR	59
5.1.	Introducción	59
5.2.	Resumen del estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI	60
5.2.1.	Pruebas con el motor Shunt	61
5.2.2.	Estudio del generador con imanes permanentes de Neodimio	61
5.2.3.	Estudio del aerogenerador de imanes permanentes de neodimio	62
5.3.	Cálculo teórico de la tensión en el generador de Neodimio	64
5.3.1.	Cálculo teórico de la tensión eficaz inducida en una bobina	64
5.3.2.	Cálculo teórico de la tensión de salida del generador	69
5.3.3.	Cálculo de la tensión de salida del rectificador	74
5.4.	Caracterización del Aerogenerador	75
5.4.1.	Relación del coeficiente de potencia y el parámetro lambda	75
5.4.2.	Circuito interno de la batería	78
5.4.3.	Explicación de funcionamiento de la hoja Excel	80
5.4.4.	Conclusiones	82
6.	ESTUDIO MECÁNICO DEL AEROGENERADOR	83
6.1.	Definición del sistema mecánico	83
6.2.	Metodología	88
6.2.1.	Balance de fuerzas sobre la cola, en la base III:	89
6.2.2.	Balance de fuerzas y momentos sobre el sistema completo, en la base 0:	92
6.2.3.	Resultados	94
7.	ESTUDIO DE VIABILIDAD ENERGÉTICA	97
7.1.	Energía necesaria para la construcción del aerogenerador	97
7.1.1.	Energía incorporada a los materiales	97
7.1.2.	Consumo total de energía	100
7.2.	Energía generada por el aerogenerador	101
7.2.1.	Estimación de la potencia eléctrica media anual	101
7.3.	Conclusiones	103
7.3.1.	Cálculo del tiempo de retorno energético	103
8.	ESTUDIO MEDIO AMBIENTAL Y SOCIAL	105
8.1.	El impacto ambiental de la energía eólica	105
8.1.1.	Ahorro de emisiones	105
8.1.2.	Otros beneficios	107
8.1.3.	Interacciones con el medio físico	108



8.1.4. Interacciones con el medio biótico	108
8.1.5. Interacciones con el medio humano.....	109
8.2. Impacto socioeconómico regional	112
9. PRESUPUESTO _____	113
9.1. Coste económico del diseño del proyecto	113
9.2. Coste económico de la construcción del aerogenerador.....	114
9.3. Presupuesto final.....	117
CONCLUSIONES _____	119
AGRADECIMIENTOS _____	121
BIBLIOGRAFÍA _____	123





1. Introducción

El origen del presente proyecto radica en la falta de energía eléctrica en poblaciones rurales pobres de países en vías de desarrollo, tales como Perú o Sri Lanka. Debido a la falta de red eléctrica que abastezca a estas poblaciones, diversas ONG's han desarrollado infraestructuras con alternativas energéticas para poder abastecer de la energía necesaria para usos mínimos como luz, radio y televisión, a muchísimas familias en estas poblaciones. Esta pequeña cantidad de energía puede mejorar el nivel de vida de los más pobres.

En estas zonas, muchas casas utilizan baterías eléctricas para tener potencia eléctrica, y a menudo se cargan en la ciudad más cercana, lo que puede ser costoso en dinero, tiempo y conveniencia. Los pequeños aerogeneradores son una opción mejor para cargar las baterías. El proyecto se desarrolla en un marco de colaboración entre ITDG y la UPC, con el objetivo de crear unos conocimientos acerca de la caracterización constructiva, mecánica y eléctrica de este tipo de aerogeneradores en la UPC, para que en un futuro, se pueda continuar el estudio llegando a fabricar un prototipo en nuestra escuela, que a su vez permita establecer más información y mejoras sobre el comportamiento de estos mecanismos.

El alcance del proyecto incorpora un manual de manufactura del aerogenerador, información de los materiales, proveedores y precios de los componentes que permita una construcción fácil, económica y correcta del aerogenerador. El estudio mecánico del sistema de protección, presenta de forma preliminar el método a desarrollar en futuros proyectos, que permitirá conocer las relaciones entre las variables que determinan el comportamiento del sistema, en función de los parámetros dimensionales del mecanismo. El estudio eléctrico del aerogenerador permite obtener, de forma aproximada, las relaciones entre todos los parámetros que influyen en el cálculo del valor de la potencia eléctrica de salida en función de la velocidad de entrada del viento, y poder así evaluar rápidamente la sensibilidad del sistema ante la variación de determinadas variables. Todas las relaciones establecidas se han basado en los resultados obtenidos en el estudio realizado por ITDG-CONCYTEC-UNI (Intermediate Technology Development Group-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Universidad Nacional de Ingeniería. [11].

Por lo que respecta al estudio energético, la realización del mismo sirve para poder evaluar el tiempo de retorno energético que necesita el aerogenerador en un lugar concreto para aportar la energía consumida en su construcción.





2. ANTECEDENTES

2.1. Dificultades de acceso a la energía

En muchos lugares del planeta el acceso a la energía eléctrica aún no es posible por desgracia, y tanto el crecimiento de la población mundial como el aumento del consumo energético (debido entre otras causas a este crecimiento de población) hacen que en un largo plazo sea imposible garantizar el acceso a la energía eléctrica para toda la población mundial.

Las primeras etapas del desarrollo económico de un país requieren una gran intensidad energética, ya que es necesario construir infraestructuras de todo tipo, lo que exige industria pesada, la cual requiere, a su vez, grandes cantidades de materia prima y, claro está, de energía. Es por eso que países en vías de desarrollo y países subdesarrollados con dificultades de obtención de energía, que requieren de una gran intensidad energética para desarrollarse y poder obtener a la vez más energía. Al no poder disponer de ésta no tienen la posibilidad de crear todas las infraestructuras que permitirían abastecerse de más energía. Es un “círculo vicioso” que dificulta el desarrollo de ciertos países más desfavorecidos.

Más de 1.600 millones de personas en el año 2.000, no tenían acceso a la electricidad, o lo que significa un 27% de la población mundial; aproximadamente 509 millones en el África sub-sahariana, 28 millones en el Sáhara, 800 millones en la India, 223 en el sur de Asia, 18 millones en China y 56 millones en Sudamérica. El banco mundial estima que el número de personas sin electricidad ha bajado de 1.900 millones en 1970, pero no de una forma proporcional, ya que en 1990, eran 2.000 millones. [1].

El nivel de electrificación para los países de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) está por encima del 99%. El nivel de electrificación para el Medio Este, el Norte de África, el Este de Asia, China y Latino América, están todos por encima del 85 %. Más del 80% de la población que sin acceso a electricidad están situados en el sur de Asia y en el África sub-Sahariana (Gráfico 2.1). La falta de electricidad está fuertemente relacionada al número de personas que viven con menos de 2\$ al día. Los ingresos, sin embargo, no son el único factor determinante del acceso a la electricidad. En China, con el 56% de su población aun pobre, se ha conseguido suministrar energía a más del 98 % de su población. [1].



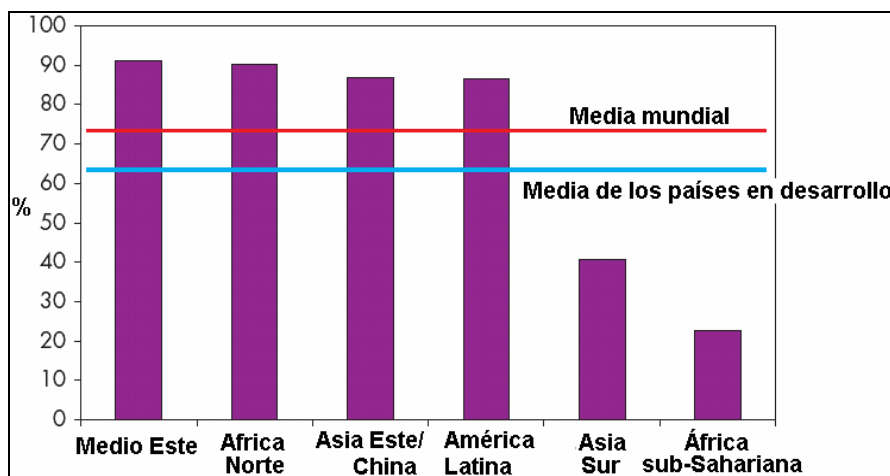


Gráfico 2.1. Niveles medios de electrificación por regiones. [1]

Con solo el 23% de su población electrificada, el África sub-Sahariana tiene el nivel de electrificación más bajo de cualquier región del mundo (Tabla 2.1). Más de 500 millones de africanos aún no tienen acceso a la electricidad. La pobreza de la región es una razón, pero es la baja densidad de población la que eleva el coste de extender la red eléctrica. [1].

Hay 580 millones de personas sin electricidad en la India. Aunque la red eléctrica técnicamente alcanza al 90% de la población, sólo un 43% están conectados actualmente debido a que mucha gente pobre no puede afrontar los gastos de la conexión. [1].

Durante las últimas tres décadas, la mitad del crecimiento poblacional en el mundo se ha producido en zonas urbanas. La electrificación en el mundo se ha mantenido con la urbanización, manteniéndose el número de población urbana sin electricidad en aproximadamente 250 millones. Un dato interesante es que el incremento de la electrificación urbana creció del 36% en 1970 al 91% en 2000. El grueso de población urbana sin acceso a electricidad vive en África y el Sur de Asia, donde más del 30% de la población urbana no tiene electricidad.

	URBANA (%)	RURAL (%)	TOTAL (%)
Norte de África	99.3	79.9	90.3
Sub-Sahara	51.3	7.5	22.6
África	63.1	16.9	34.3
Sur de Asia	68.2	30.1	40.8
América Latina	98.0	51.5	86.6
Este de Asia/China	98.5	81.0	86.9
Medio Este	98.5	76.6	91.1
Países en desarrollo	85.6	51.1	64.2
El mundo	91.2	56.9	72.8

Tabla 2.1. Niveles de electrificación por región, en zonas rurales y urbanas. [1].



Cuatro de cada cinco personas sin acceso a electricidad viven en áreas rurales. En África, más del 83% de la población en zonas rurales aun carece de electricidad. En el África Sub-Sahariana, más del 92% de la población rural no tiene acceso a la electricidad. En el sur de Asia, el 70% de la población rural no tiene acceso a la electricidad.

Al nivel de conexiones de la pasada década, llevará más de 40 años electrificar el Sur de Asia y casi el doble de tiempo para el África sub-sahariana. [1].

2.1.1. Precio de la electricidad

Incluso cuando existe la infraestructura para suministrar electricidad a los pobres, éstos muchas veces se ven incapaces de pagarla. Principalmente hay dos barreras:

- El coste inicial de conexión a la red y del cableado interior, que puede ser muy elevado para casas pobres.
- El pago mensual del consumo realizado; debido a que mucha gente pobre no gana un salario regular, es difícil para ellos mantener los pagos mensuales de la electricidad.

Como resultado, muchos países en desarrollo subvencionan la electricidad a las casas. En muchos países, la cantidad de subvenciones y el modo como se entregan tiene como resultado muchas pérdidas económicas, despilfarros por parte de los consumidores y efectos medioambientales negativos. No obstante, incluso cuando los sueldos son suficientemente elevados, muchas casas se desaniman a conectarse por la pobre calidad del servicio, incluyendo cortes frecuentes. [1].

2.1.2. Alternativas energéticas

En zonas rurales, es más interesante centrar la inversión más en aprovechar los recursos propios de cada zona, incluyendo combustibles fósiles, para hacer funcionar actividades de generación. Las inversiones más pequeñas son más probables para proveer fondos y beneficiarán más a la gente pobre. La tecnología utilizada debería estar basada en la economía y en la disponibilidad natural de recursos. En zonas remotas, donde la distancia a la red es demasiado costosa como para conectar las comunidades a la red nacional o regional, los proyectos descentralizados son una opción. (Tabla 2.2). Lo que se necesita es una estrategia global, coordinando políticas y programas que por tecnología, economía y capacidad constructiva puedan llevarse a cabo.



TECNOLOGÍA	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Motores Diesel	Bombas de agua Molinos Refrigeración Iluminación y comunicación	Mantenimiento fácil Servicio energético continuo (24h) Permite actividades que generan ingresos	Alto gasto de combustible Emisiones nocivas y de CO ₂
Pequeños equipos de biomasa	Bombas de agua Molinos Refrigeración Iluminación y comunicación	Permite actividades que generan ingresos Posible generación continua	Emisiones nocivas
Mini-hidráulica	Molinos Iluminación y comunicación Otros	Larga vida Alta fiabilidad Permite actividades que generan ingresos	Localización específica Disponibilidad intermitente del agua
Eólica	Bombas Molinos Iluminación y comunicación	Sin combustibles	Baterías caras Servicio intermitente de Energía
Solar-fotovoltaica	Iluminación básica Equipos electrónicos	Sin combustibles	Alto coste de capital Alto coste de recambio de la Batería Necesita más I + D

Tabla 2.2. Ejemplos de tecnologías de equipos de potencia sin conexión a la red. [1].

2.1.3. Dependencia de la biomasa

Debido al coste de acceso a la electricidad muchas personas optan por el uso de energías alternativas como las mostradas anteriormente. En la mayoría de los casos se toma la biomasa como solución fácil, económica y al alcance. Pero son muchas las desventajas de la dependencia de la biomasa. La gente pobre en países en desarrollo dependen muchísimo de la biomasa tradicional para cocinar y calentar. En estos países, 2.400 millones de personas dependen de la biomasa tradicional. La población incluida en la tabla 2.3 puede tener o no acceso a la electricidad para iluminar, pero generalmente carecen de acceso a servicios modernos para cocinar y calentar.

	Millones de personas	% de la población del la región
China	706	56
Indonesia	155	74
Resto del Este de Asia	137	37
India	585	58
Resto del sur de Asia	128	41
América Latina	96	23
Norte de África/Medio Este	8	0,05
África sub-Sahariana	575	89
Países en desarrollo	2.390	52

Tabla 2.3. Población que depende de la biomasa tradicional para cocinar y para calentar, en países en desarrollo en el año 2000. [1].

El extenso uso de la biomasa de formas tradicionales y la disponibilidad limitada de combustibles modernos son muestras de pobreza. Este uso también impide el desarrollo económico y social:



- **Tiempo perdido recogiendo combustible:** El uso extendido de madera y carbón vegetal puede resultar un sacrificio. Esto fuerza a la gente (generalmente mujeres y niños) a perder horas recogiendo madera y otras formas de combustible muy lejos de sus hogares. En la India, de 2 a 7 horas cada día se dedican a la recolección de combustible para cocinar. Esto reduce el tiempo que la gente puede dedicar a otras actividades productivas, como el cultivo o la educación.
- **El género:** El 70% de toda la gente que vive en situación de pobreza son mujeres. Las mujeres son de gran importancia en la mejora de los servicios energéticos porque ellas son las usuarias principales de la energía del hogar. Tienen más probabilidades de sufrir los efectos sobre la salud de las aplicaciones ineficientes de este tipo de energías.
- **Medio Ambiente:** La recogida de madera como combustible conlleva la escasez local y el daño ecológico en zonas de alta densidad de población donde hay una gran demanda de madera.
- **La eficiencia energética:** En países en desarrollo, los combustibles de biomasa se queman a menudo en hornos ineficientes. La madera es mucho menos eficiente para cocinar que los combustibles modernos, como el queroseno y los GLP.
- **La salud:** El uso de la biomasa puede acarrear daños graves a la salud por inhalación en lugares cerrados de los humos de combustión o por llevar los niños y las mujeres cargas demasiado pesadas de madera. Los posibles efectos van desde enfermedades respiratorias, tales como asma e infecciones respiratorias agudas hasta enfermedades de poco peso, mortinato y enfermedades cardíacas. Se estima que 2,5 millones de mujeres y niños en países en desarrollo mueren prematuramente cada año a causa de la respiración de humos de los hornos de biomasa.
- **Productividad agrícola:** El uso de la energía de biomasa reduce la producción agrícola, debido a que los residuos agrícolas y excrementos se usan habitualmente como fertilizantes. Cuanto más biomasa se utiliza para la casa, menos queda disponible como fertilizante. El uso de excrementos como combustible en la India se valora en 800 millones de dólares al año si fuera utilizado como fertilizante.



2.2. El papel de la energía

2.2.1. En el desarrollo

El consumo de energía es consubstancial al desarrollo económico y social. El acceso a la energía permite mejorar las condiciones de vida, incluyendo mejoras en la salud, la alimentación y la educación.

Tanto el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) como la AIE han puesto de manifiesto el estrecho vínculo que existe entre el nivel de desarrollo de un país (medido según el índice de desarrollo humano, IDH, un indicador del PNUD que tiene en cuenta la esperanza de vida, el grado de escolarización y alfabetización y la renta per cápita) y su consumo energético. La conexión salta a la vista en los países más pobres, donde la relación entre el IDH y el consumo de energía per cápita es muy acusada (Gráfico 2.2).

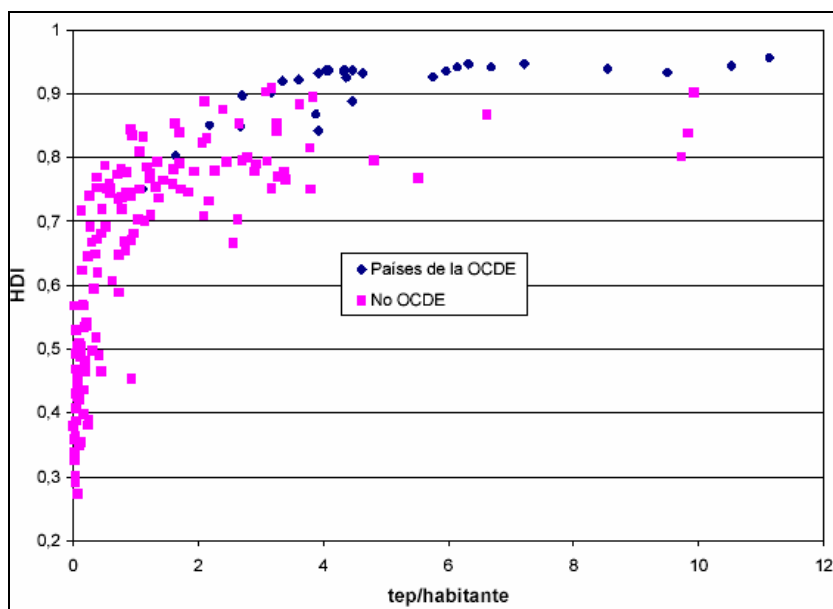


Gráfico 2.2. Relación entre el índice de desarrollo humano (HDI) y el consumo de energía primaria (año 2002). [2].

En los países menos afortunados el uso de la energía va directamente ligado al grado de desarrollo. Ya que el acceso a la energía permite mejorar las condiciones de vida de los individuos. Como se verá más adelante, la energía es fundamental para cumplir los objetivos de desarrollo del milenio, pero a continuación se muestran unos ejemplos de cómo el uso eficiente de la energía ayuda a mejorar aspectos como la salud, la alimentación y la educación:



- El acceso a formas modernas de energía evita el consumo poco eficiente de biomasa tradicional (leña y excrementos animales) en hornos y cocinas rudimentarios; de esta forma la atmósfera doméstica es más saludable, con la consecuente reducción de enfermedades respiratorias en mujeres y niños (que son quienes más tiempo pasan dentro de la vivienda).

- En la mayor parte de los países empobrecidos las mujeres (adultas y jóvenes) son las que llevan el peso de las tareas domésticas y, en zonas rurales, dedican una parte muy importante de su tiempo al acopio de combustible; el acceso a combustibles modernos les permite ganar un tiempo que pueden dedicar a mejorar la productividad de los huertos, a la educación, a cuidar de los hijos, etc.

- La electricidad permite alargar las horas de luz (mejora de la productividad en talleres de artesanía, niños y adultos pueden estudiar tras la puesta de sol, etc.) y permite, por ejemplo, conservar medicamentos en neveras en puestos de asistencia médica.

- La energía permite utilizar maquinaria e incrementar la productividad de terrenos, mejorando la alimentación de comunidades rurales, favoreciendo la venta de excedentes (así como la manufactura de productos elaborados y con valor añadido a partir de los excedentes).

La energía ayuda, pues, a salir de la pobreza, a reducir la mortalidad infantil y a disminuir las diferencias de género, entre otros beneficios.



2.2.2. La lista de objetivos del milenio de la ONU para el 2015

En Abril del 2001, en la novena sesión de la Comisión para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, los gobiernos del mundo, confeccionaron un listado de objetivos de desarrollo del milenio:

Objetivos del desarrollo del Milenio	
Objetivos y metas	Indicadores
Objetivo 1: Erradicar la pobreza extrema y el hambre	
Meta 1: Reducir a la mitad, entre 1990 y 2015, el porcentaje de personas cuyos ingresos sean inferiores a 1 dólar por día	<ol style="list-style-type: none"> 1. Porcentaje de la población cuyos ingresos son inferiores a 1 dólar por día (valores de PPA) 2. Coeficiente de la brecha de pobreza (la incidencia de la pobreza multiplicada por la gravedad de la pobreza) 3. Proporción del consumo nacional que corresponde a la quinta parte más pobre de la población
Meta 2: Reducir a la mitad, entre 1990 y 2015, el porcentaje de personas que padezcan hambre	<ol style="list-style-type: none"> 4. Número de niños menores de 5 años de peso inferior al normal 5. Porcentaje de la población por debajo del nivel mínimo de consumo de energía alimentaria
Objetivo 2: Lograr la enseñanza primaria universal	
Meta 3: Velar por que, para el año 2015, los niños y niñas de todo el mundo puedan terminar un ciclo completo de enseñanza primaria	<ol style="list-style-type: none"> 6. Tasa de matrícula neta en la enseñanza primaria 7. Porcentaje de los estudiantes que comienzan el primer grado y llegan al quinto grado 8. Tasa de alfabetización de las personas de edades comprendidas entre los 15 y los 24 años
Objetivo 3: Promover la igualdad entre los sexos y la autonomía de la mujer	
Meta 4: Eliminar las desigualdades entre los géneros en la enseñanza primaria y secundaria, preferiblemente para el año 2005, y en todos los niveles de la enseñanza antes del fin del año 2015	<ol style="list-style-type: none"> 9. Relación entre niñas y niños en la educación primaria, secundaria y superior 10. Relación entre las tasas de alfabetización de las mujeres y los hombres de edades comprendidas entre los 15 y los 24 años 11. Proporción de mujeres entre los empleados remunerados en el sector no agrícola 12. Proporción de puestos ocupados por mujeres en el parlamento nacional
Objetivo 4: Reducir la mortalidad infantil	
Meta 5: Reducir en dos terceras partes, entre 1990 y 2015, la mortalidad de los niños menores de 5 años	<ol style="list-style-type: none"> 13. Tasa de mortalidad de los niños menores de 5 años 14. Tasa de mortalidad infantil 15. Porcentaje de niños de 1 año vacunados contra el sarampión



Objetivo 5: Mejorar la salud materna	
Meta 6: Reducir, entre 1990 y 2015, la mortalidad materna en tres cuartas partes	16. Tasa de mortalidad materna 17. Porcentaje de partos con asistencia de personal sanitario especializado
Objetivo 6: Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades	
Meta 7: Haber detenido y comenzado a reducir, para el año 2015, la propagación del VIH/SIDA	18. Tasa de morbilidad del VIH entre las mujeres embarazadas de edades comprendidas entre los 15 y los 24 años 19. Tasa de uso de anticonceptivos 20. Número de niños huérfanos por causa del VIH/SIDA
Meta 8: Haber detenido y comenzado a reducir, para el año 2015, la incidencia del paludismo y otras enfermedades graves	21. Índices de morbilidad y mortalidad palúdicas 22. Proporción de la población de zonas de riesgo de paludismo que aplica medidas eficaces de prevención y tratamiento del paludismo 23. Tasas de morbilidad y mortalidad asociadas a la tuberculosis 24. Proporción de casos de tuberculosis detectados y curados con el tratamiento breve bajo observación directa
Objetivo 7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente	
Meta 9: Incorporar los principios del desarrollo sostenible en las políticas y los programas nacionales e invertir la pérdida de recursos del medio ambiente	25. Proporción de la superficie de las tierras cubiertas por bosques 26. Superficie de las tierras protegidas para mantener la diversidad biológica 27. Producto interno bruto (PIB) por unidad de utilización de energía (representa el uso eficiente de la energía) 28. Emisiones de dióxido de carbono (per cápita) [Más dos indicadores de la contaminación atmosférica global: el agotamiento de la capa de ozono y la acumulación de gases de efecto invernadero]
Meta 10: Reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de personas que carezcan de acceso sostenible a agua potable	29. Proporción de la población con acceso sostenible a mejores fuentes de abastecimiento de agua
Meta 11: Haber mejorado considerablemente, para el año 2020, la vida de por lo menos 100 millones de habitantes de tugurios	30. Proporción de la población con acceso a mejores servicios de saneamiento 31. Proporción de la población con derecho seguro a la tenencia de tierra [El desglose de varios de estos indicadores por población urbana y rural puede ser pertinente para seguir de cerca el mejoramiento de la vida de los habitantes de barrios de tugurios]



Objetivo 8: Fomentar una asociación mundial para el desarrollo a desarrollo*	
<p>Meta 12: Desarrollar aún más un sistema comercial y financiero abierto, basado en normas, previsible y no discriminatorio</p> <p>Se incluye el compromiso de lograr una buena gestión de los asuntos públicos y la reducción de la pobreza, en cada país y en el plano internacional</p>	<p><i>En los casos de los países menos adelantados, los países africanos, los países sin litoral y los pequeños Estados insulares en desarrollo, algunos de los indicadores mencionados a continuación se vigilarán por separado.</i></p> <p><u>Asistencia oficial para el desarrollo</u></p> <p>32. La AOD neta como porcentaje del ingreso nacional bruto (INB) de los países donantes del Comité de Asistencia para el Desarrollo (CAD) (los objetivos son destinar el 0,7% del total del ingreso nacional bruto a la AOD y el 0,15% a los países menos adelantados)</p> <p>33. Proporción de la AOD destinada a los servicios sociales básicos (educación básica, atención primaria de la salud, nutrición, abastecimiento de agua potable y servicios de saneamiento)</p> <p>34. Proporción de la AOD que no está condicionada</p> <p>35. Proporción de la AOD destinada al medio ambiente de los pequeños Estados insulares en desarrollo</p> <p>36. Proporción de la AOD destinada al sector del transporte de los países sin litoral</p>
<p>Meta 13: Atender las necesidades especiales de los países menos adelantados</p> <p>Se incluye el acceso libre de aranceles y cupos de las exportaciones de los países menos adelantados; el programa mejorado de alivio de la deuda de los países pobres muy endeudados y la cancelación de la deuda bilateral oficial, y la concesión de una asistencia para el desarrollo más generosa a los países que hayan expresado su determinación de reducir la pobreza</p>	<p><u>Acceso a los mercados</u></p> <p>37. Proporción de las exportaciones (por su valor y sin incluir las armas) admitidas libre de derechos y cupos</p> <p>38. Aranceles y cupos medios aplicados a los productos agrícolas y textiles y el vestido</p> <p>39. Subsidios a la exportación y la producción de productos agrícolas en los países de la OCDE</p> <p>40. Proporción de la AOD ofrecida para ayudar a crear la capacidad comercial</p>
<p>Meta 14: Atender las necesidades especiales de los países sin litoral y de los pequeños Estados insulares en desarrollo</p> <p>(mediante el Programa de Acción para el desarrollo sostenible de los pequeños Estados insulares en desarrollo y los resultados del vigésimo segundo período de sesiones de la Asamblea General)</p>	<p><u>Sostenibilidad de la deuda</u></p> <p>41. Proporción de la deuda bilateral oficial de los países pobres muy endeudados que ha sido cancelada</p> <p>42. Servicio de la deuda como porcentaje de las exportaciones de bienes y servicios</p> <p>43. Proporción de la AOD ofrecida como alivio de la deuda</p> <p>44. Número de países que alcanzan los puntos de decisión y de culminación en la iniciativa para la reducción de la deuda de los países muy endeudados</p>
<p>Meta 15: Encarar de manera general los problemas de la deuda de los países en desarrollo con medidas</p>	



Meta 16: En cooperación con los países en desarrollo, elaborar y aplicar estrategias que proporcionen a los jóvenes un trabajo digno y productivo	45. Tasa de desempleo de las personas comprendidas entre los 15 y los 24 años
Meta 17: En cooperación con las empresas farmacéuticas, proporcionar acceso a los medicamentos esenciales en los países en desarrollo	46. Proporción de la población con acceso estable a medicamentos esenciales a precios razonables
Meta 18: En colaboración con el sector privado, velar por que se puedan aprovechar los beneficios de las nuevas tecnologías, en particular de las tecnologías de la información y de las comunicaciones	47. Número de líneas de teléfono por 1.000 habitantes 48. Número de computadoras personales por 1.000 habitantes <i>Se determinarán además otros indicadores</i>

Tabla 2.4. Objetivos de Desarrollo del Milenio. [4]

2.2.3. Importancia de la energía en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo del milenio de la ONU

Se ha clasificado una serie de aspectos en los que el tener acceso a la energía puede ayudar a conseguir para cada uno de los objetivos del milenio según el objetivo:

- Objetivo 1: Erradicar la pobreza extrema y el hambre
 - El acceso a servicios energéticos de combustibles líquidos, sólidos y electricidad, permite el desarrollo empresarial.
 - La iluminación permite la generación de ingresos más allá de las horas de luz.
 - La maquinaria incrementa la producción.
 - Los suministros locales de energía a menudo se pueden proporcionar a pequeña escala, con negocios propios creando empleo en el servicio local de suministro de energía y mantenimiento.
 - Los combustibles limpios y eficientes reducen la gran parte de gastos de una casa en cocinar, iluminar y mantener caliente el hogar.
 - La mayoría (95%) de los alimentos de primera necesidad se deben cocinar antes de comer y necesitan agua.
 - Se reducen las pérdidas post-cultivo gracias a una mejor preservación enfriando/congelando.
 - La energía para el riego aumenta la producción de alimentos y el acceso a la nutrición.



➤ Objetivo 2: Lograr la enseñanza primaria universal

- La energía puede ayudar creando un ambiente más agradable (acceso a agua limpia, sanidad, luz, y zonas con calefacción/ventilación), gracias a mejorar la atención en la escuela y reduciendo los abandonos escolares.

- La iluminación en las escuelas ayuda a retener profesores, especialmente si su alojamiento dispone de electricidad.

- La electricidad permite acceder a medios educacionales y comunicaciones en las escuelas y en casa. Esto incrementa las oportunidades de educación y permite el aprendizaje a distancia.

- El acceso a energía acarrea la oportunidad de utilizar equipos para enseñar (proyectores, ordenadores, impresoras, fotocopiadoras, equipos científicos).

- Los accesos modernos de energía y los diseños eficientes de edificios reducen los costes de calefacción/refrigeración.

➤ Objetivo 3: Promover la igualdad entre los sexos y la autonomía de la mujer

- La disponibilidad de servicios energéticos modernos libera a las niñas y mujeres jóvenes de mucho tiempo dedicado a actividades de supervivencia (recoger leña, ir a buscar agua, cocinar ineficazmente, cosechar a mano, trabajo manual en el campo).

- Los equipos de combustibles limpios de cocina reducen la exposición al aire contaminado y mejora su salud.

- Una iluminación de calidad permite estudiar en casa y las clases vespertinas (sin luz, y cuando ya se han realizado las tareas de la casa).

- La iluminación de las calles mejora la seguridad de las mujeres.

- Los servicios energéticos afrontables y fiables ofrecen oportunidades a empresas de mujeres.

➤ Objetivo 4: Reducir la mortalidad infantil

- La polución en las casas contribuye a infecciones respiratorias que justifica más del 20% de las 11 millones de muertes de niños cada año. [5]

- La recogida y preparación de combustibles tradicionales expone la salud de los niños más jóvenes a riesgo y reduce el tiempo dedicado a la atención de éstos.

- El abastecimiento de comida cocinada nutritiva, un espacio para calentar y el agua hervida, contribuyen a una mejor salud.

- La electricidad permite el bombeo de agua limpia y su depuración.



- Objetivo 5: Mejorar la salud materna
 - Se necesitan los servicios energéticos para acceder a facilidades médicas para el cuidado materno, incluyendo la refrigeración de ciertas medicinas, la esterilización de los equipos, y las salas de operaciones.
 - Las cargas excesivas de trabajo y el duro trabajo manual (llevando pesos de leña y agua) puede afectar a la salud y bienestar de las mujeres embarazadas.

- Objetivo 6: Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades
 - La electricidad en los centros de salud permite la disponibilidad nocturna, ayuda a retener a personal cualificado, y permite el uso de equipos (esterilización, refrigeración de medicamentos, etc).
 - El uso de la energía para refrigerar permite la vacunación y el almacenamiento de medicamentos para prevención y tratamiento de enfermedades e infecciones.
 - La electricidad permite acceder a medios de información de educación de la salud a través de tecnologías de información y comunicación.

- Objetivo 7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente
 - El crecimiento de la producción agrícola se facilita con el uso de maquinaria e irrigación, lo cual a su vez reduce la necesidad de expandir la cantidad de tierra cultivada, reduciendo la presión sobre el ecosistema.
 - El uso de combustibles tradicionales contribuye a la erosión, reduce la fertilidad del suelo, y contribuye a la desertización. La sustitución de combustible, mejora la eficiencia, y los cultivos de energía pueden hacer una explotación de los recursos naturales más sostenible.
 - Usar combustibles más limpios y eficientes, reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero, que son los mayores contribuyentes al cambio climático.
 - La producción de energía limpia puede fomentar mejor la gestión de los recursos naturales, incluyendo el agua de mejor calidad.
 - La energía se puede utilizar para depurar el agua o bombear agua limpia, reduciendo el tiempo dedicado a recogerla y reduciendo así el trabajo pesado.



2.2.4. Papel específico de la energía eléctrica en ambos aspectos

La energía eléctrica es una forma evolucionada de energía final: debe producirse a partir de energía primaria y está muy ligada al nivel de desarrollo de los países. La fracción que representa la electricidad respecto del consumo de energía final es más alto cuanto más evolucionadas están las sociedades: su uso es indispensable para el nivel de confort doméstico occidental, y la sociedad del conocimiento y la información sería imposible sin ella.

En países con una gran dispersión rural y donde no hay una infraestructura de distribución, la generación distribuida, y casi siempre aislada, utilizando energías renovables no sólo representa una opción viable, sino que, a menudo, es la única solución para proporcionar acceso a la electricidad a una parte muy importante de la población.

2.3. La alternativa de la eólica de baja potencia

Como se ha comentado anteriormente, aun más de 2.000 millones de personas, la mayoría en zonas rurales alejadas de cualquier acceso a la red eléctrica, continúan utilizando combustibles tradicionales como madera, carbón, residuos agrícolas y de animales, con tal de conseguir calefacción y cocinar los alimentos. El alto coste de estos patrones de producción y consumo de energía, limita en gran medida las oportunidades de desarrollo social y económico de estas comunidades, a la vez que contribuyen a la degradación medioambiental tanto a nivel regional como global.

Como se observa en la meta 1 del objetivo 1 de los objetivos de desarrollo del milenio, se quiere disminuir a la mitad el número de personas que viven con menos de 1 dólar diario para el 2015, para lo cual el acceso a fuentes de energía asequibles es un prerrequisito. Este reto, presenta una oportunidad para encontrar caminos alternativos para la producción y el uso de la energía que sean, económicamente, socialmente y medioambientalmente sostenibles, que a la vez introduzcan una herramienta importante como medio para conseguir el desarrollo humano.

La energía eólica comparada con otros tipos de alternativas energéticas renovables resulta competitiva frente a la fotovoltaica, la biomasa y la de generadores diesel, sólo resulta más cara que la micro-hidráulica.



También, es muy atractiva por su potencial de creación de trabajo y la facilidad con la que su tecnología puede ser transferida a países en vías de desarrollo, facilitando, así, las tareas de capacitación y la promoción de los mecanismos de mercado que, si son debidamente diseñados y complementados con medidas reguladoras, pueden contribuir a solucionar la crisis energética en el hemisferio Sur, a la vez que contribuyen a la protección del medio ambiente.

En un escenario energético más amplio, con ciertas restricciones geográficas y climatológicas, la energía eólica puede complementar a otras soluciones cuyo acercamiento a estas zonas es bastante costosa. Este hecho, amplía el abanico de proyectos de producción y consumo de energía en zonas donde el coste de la extensión de la conexión a la red eléctrica resulta inviable, y en muchas ocasiones la situación más asequible puede ser un sistema híbrido que combine energía eólica, fotovoltaica y generadores diesel.

➤ Aerogeneradores pequeños para el desarrollo rural

El aerogenerador convierte la energía del viento en energía eléctrica, que puede ser usada para la carga de baterías, electrificación de cases y granjas, reducción del consumo de generadores diesel, accionamiento de bombas para la extracción de agua, etc. Dada la naturaleza intermitente del viento, es usual incorporar al sistema algún tipo de dispositivo de almacenamiento, se vienen utilizando baterías convencionales de plomo-ácido con una capacidad de 1kWh.

➤ Construcción de un aerogenerador de imanes permanentes

Enginyeria Sense Fronteres (ESF) en colaboración con “Intermediated Technology Development Group” (ITDG) propone la construcción de un aerogenerador simple de imanes permanentes, basado en el modelo existente desarrollado por ITDG con el patrocinio del “UK Department for International Development”. En los últimos años, ITDG ha desarrollado una gran actividad introduciendo este tipo de máquinas en Perú y en Sri Lanka, dentro de programas integrales de desarrollo.



Es la propuesta de construcción del aerogenerador de imanes permanentes, denominado IT-100, la que nos lleva a la interesante tarea de desarrollar un proyecto que tiene como objetivos fundamentales, el desarrollar un manual muy concreto y determinado para la construcción de dicho aerogenerador que permita facilitar las gestiones necesarias para obtención de materiales, montaje, puesta a punto del aerogenerador, así como adecuarlo a un presupuesto lo más óptimo posible. Además como, se ha comentado en la introducción, es de interés ampliar los conocimientos sobre el funcionamiento eléctrico y mecánico de este tipo de aparatos, para determinar así, los puntos clave que precisan ser mejorados en futuros proyectos.

2.3.1. Uso del aerogenerador de baja potencia

En zonas sin red eléctrica, muchas casas utilizan baterías eléctricas de motocicletas, coches o camiones para tener potencia para radios o televisión. Esta pequeña cantidad de energía puede mejorar desproporcionadamente la vida normal de los más pobres. Cuando hay suficiente energía para dar luz, se puede mejorar las oportunidades de mucha gente; por ejemplo mejorando las oportunidades que tendrán los niños en su vida posteriormente, permitiéndoles estudiar cuando anochezca, o permitiendo realizar trabajos diversos a la población cuando anochezca con los beneficios que esto puede reportar. Es importante señalar que en países como Perú, anochece a las 6 de la tarde, con lo cual el hecho de disponer o no de luz influye de manera significativa en la vida de ciertas poblaciones.

Es en la carga de estas baterías donde entra el juego la utilización de aerogeneradores de baja potencia, con sus puntos a favor y contra a tener en cuenta.

➤ Ventajas

- *La cantidad de energía disponible de las baterías puede aumentar, y no se tendrán que comprar nuevas baterías tan frecuentemente:* En una buena localización, y cuidando el manejo de la energía y la batería, la cantidad de energía disponible para usarse por un hogar será mayor cuando la batería se cargue gradualmente que cuando se cargue periódicamente. La potencia de la batería se utiliza para iluminar, esto puede reducir el gasto en baterías de queroseno y baterías secas, que se estima en más de 5 dólares al mes. Además, las baterías actualmente se estropean por descargas muy fuertes, y esto las deja inservibles más rápido que si fueran cargadas por un aerogenerador. [8]



- *Las baterías se pueden cargar cerca de la casa, ahorrando tiempo y dinero:* En Sri Lanka más de la mitad de las casas utilizaban baterías de automóvil para dar potencia a radios y televisores. Recargar implica un coste económico y un viaje de 6 km dos veces al mes. [8]

- *La energía eólica respeta el medio ambiente:* Aunque se utiliza energía en la construcción de un aerogenerador, una vez están funcionando, no consume combustibles fósiles y por tanto no emite gases de efecto invernadero. Debido a que la electricidad producida para iluminar descarta el uso de queroseno, el ambiente de la casa mejora. El ruido producido a las bajas velocidades de giro es muy pequeño y muchísimo menor que el producido por generadores diesel. El impacto sonoro y visual del sistema descrito no ha causado preocupación en ninguna de las instalaciones probadas. [8]

- *La energía eólica es más barata que sus alternativas:* Donde el recurso eólico es bueno, la energía producida mediante aerogeneradores es más barata que utilizando generadores diesel o fotovoltaicos, particularmente si el suministro de combustible está lejos del usuario. Si el sitio está localizado cerca de un río o riachuelo, la potencia hidráulica debería estudiarse primero, ya que esta puede ser más competitiva. La electricidad (de red), si está disponible, será lo más barato de todo. En áreas remotas, sin embargo, el coste de la conexión a la red es tan elevado, que excede mucho de los sistemas que utilizan baterías (solares o eólicas). [8]

- *Puede ser una opción aún más atractiva:* La potencia de la batería puede ser un paso intermedio antes de la conexión a la red, ya que mediante el uso de inversores se consigue corriente alterna que va a parar a los diferentes conexiones y aparatos de la casa que en un futuro sin ser modificados sirven para la conexión a la red. Por otro lado, se puede compartir un aerogenerador grande (pero de baja potencia) por 2 o 3 casas facilitando la inversión inicial que se comparte, al igual que el mantenimiento. Además las máquinas de manufactura local pueden mantenerse fácilmente, aportan empleo local, resultan más baratas y se adaptan mejor a las condiciones locales de diseño. [8]

➤ Desventajas

- *La importancia del régimen de viento:* El factor más importante en el éxito o fracaso de cualquier instalación eólica es la fuerza y naturaleza del viento.



- *Coste inicial:* Para poner el generador y las palas en la trayectoria del viento, el aerogenerador necesita ser colocado en el extremo superior de una torre, que requiere tiempo preparar y levantar. Finalmente, será necesario alojar las baterías y el circuito de control en un edificio a prueba de la intemperie. [8]

- *Mala reputación de los aerogeneradores:* Agencias de ayuda en el pasado han puesto a punto prototipos inapropiados, que importaban la tecnología del país donante. Quizá no se han comprendido correctamente los puntos fuertes y débiles de los aerogeneradores y es posible que haya sido demasiado difícil de resolver la tecnología unifamiliar. Otra causa de la engañosa mala fama es la carencia en muchos casos de datos disponibles del viento más concretos para cada población (no se puede generalizar con los datos de un país). [8]

2.3.2. Ejemplos de uso del aerogenerador de baja potencia

Los aerogeneradores que se tratan han sido diseñados para hogares familiares en zonas de vientos moderados sin acceso a la red eléctrica. Pensados para construcción local, y ser lo más baratos posible. La peculiaridad principal del aerogenerador de ITDG, el IT-100 es que funciona con un generador de imanes permanentes o “Permanent Magnet Generator” (PMG).



Foto 2.1. Utilización de un aerogenerador de baja potencia en una casa rural en Zimbabwe. (Hugh Piggott) [8]





Foto 2.2: Fluorescente potenciado por viento utilizado como luz exterior en Sri Lanka, para mantener alejados a los elefantes de la casa y los cultivos (Simon Dunnett).[8]

A continuación se muestra la producción aproximada mensual para varios tamaños de generadores (PMG) en varias localizaciones.

Diámetro del Rotor (m)	Velocidad media del viento (m/s)			
	3	4	5	6
1	2	6	10	20
2	10	25	50	70
3	20	60	100	160
4	40	100	200	280
5	60	160	300	430

Tabla 2.4. Producción aproximada de energía mensual (kWh) para varios tamaños de aerogeneradores en varias localizaciones diferentes. [8]

Partiendo de manera aproximada, y para dar una idea general de los niveles de suministro de un aerogenerador de baja potencia, se puede aceptar la tabla anterior como primera aproximación que sirve para poder comparar la generación de energía con los ejemplos reales de demandas de energía de varias casas que se muestran seguidamente.

Los ejemplos describen las necesidades energéticas en casas de un pueblo de Sri Lanka. Estos son cálculos aproximados, así que es apropiado abarcar todos los datos.



Aparato	Potencia nominal (W)	número	Horas de uso diario	Demanda energética diaria (Wh)	Demanda mensual (kWh)
Fluorescente	20	3	4	240	7.2
TV sin color	30	1	4	120	3.6
Radio-cassette	10	1	5	50	1.5
Energía total requerida				410	12.3
Energía total con pérdidas en batería (+25%)				512.5	15.4
Máxima potencia requerida	100				
Potencia media requerida (Wh totales/24h)				21	

Tabla 2.5. Ejemplo 1, de la demanda eléctrica en una casa en Sri Lanka. [8]

La potencia máxima demandada puede ser de ayuda en la elección de los cables, o el inversor, para conocer el pico de demanda.

Finalmente la potencia media se puede encontrar dividiendo la energía por día por 24 horas al día. La potencia media da una idea más significativa del tamaño del sistema de lo que lo hacen los números de energía diarios.

Las demandas de potencia no darán exactamente el suministro en un momento dado. El uso de baterías efectivamente soluciona este problema, y permite al usuario coger energía cuando el viento es ligero o no hay, y guardar energía cuando el viento es fuerte. Así mientras la potencia media que entra en la batería sea la misma que la potencia media que sale durante un periodo de unas pocas horas (o tanto tiempo como permita la capacidad de las baterías) la casa no debería acabarse la electricidad, incluso si ellos usan más potencia que la media por un rato. Esto significa que el generador solo necesita, como media, producir el requerimiento de potencia media más que una potencia de pico. En realidad necesitará producir algo más de potencia que la media demandada ya que se producen pérdidas de energía en el sistema.

Otros ejemplos reales son los siguientes:

Aparato	Potencia nominal (W)	número	Horas de uso diario	Demanda energética diaria (Wh)	Demanda mensual (kWh)
Fluorescente	20	3	4	240	7.2
TV sin color	30	1	1	30	0.9
Radio-cassette	10	2	5	100	3
Energía total requerida				370	11.1
Energía total con pérdidas en batería (+25%)				462.5	13,875
Energía total con pérdidas con inversor (+10%)				508,75	15,263
Máxima potencia requerida	110				
Potencia media requerida (Wh totales/24h)				21	

Tabla 2.6. Ejemplo 2, de la demanda eléctrica en una casa en Sri Lanka. [8]



Aparato	Potencia nominal (W)	número	Horas de uso diario	Demanda energética diaria (Wh)	Demanda mensual (kWh)
Fluorescente	20	3	4	240	7.2
TV sin color	30	1	1	30	0.9
Radio-cassette	10	2	5	100	3
Mantequera C.A. (2 horas por semana)	200	1	0.25	50	1.5
Energía total requerida				420	12.6
Energía total con pérdidas en batería (+25%)				525	15.75
Energía total con pérdidas inversor (+10%)				577.5	17,325
Máxima potencia requerida	310				
Potencia media requerida (Wh totales/24h)				24	

Tabla 2.7. Ejemplo 3, de la demanda eléctrica en una casa en Sri Lanka. [8]

Aparato	Potencia nominal (W)	número	Horas de uso diario	Demanda energética diaria (Wh)	Demanda mensual (kWh)
Fluorescente	20	3	4	240	7.2
Radio-cassette	10	1	5	50	1.5
Energía total requerida				290	8.7
Energía total con pérdidas en batería (+25%)				362.5	10,875
Energía total con pérdidas inversor (+10%)				398,75	11,963
Máxima potencia requerida	70				
Potencia media requerida (Wh totales/24h)				17	

Tabla 2.9. Ejemplo 4, de la demanda eléctrica en una casa en Sri Lanka. [8]

Así pues, conociendo las necesidades de cada hogar y la disponibilidad eólica en cada localización, se puede estimar el tipo de aerogenerador que será necesario para cubrir estas necesidades.





3. DESCRIPCIÓN DEL AEROGENERADOR

El tipo de aerogenerador que se trata en este proyecto ha sido diseñado para hogares familiares en zonas de vientos moderados sin acceso a la red eléctrica. Está pensado para construcción local, y ha sido diseñado para ser lo más barato posible. Los rasgos básicos (mostrados en la Fig. 3.1) son comunes a muchos pequeños aerogeneradores, pero hay algunas ideas originales en el diseño de ITDG. En el anexo F se adjunta un manual detallado de construcción del aerogenerador que se describe en este capítulo.

El aparato eólico se compone de: el generador, el rotor eólico (las palas), la montura del aerogenerador y la cola (formando ambos el mecanismo de cola de veleta) y la estructura que soporte el esfuerzo del peso de todo el conjunto y el momento flector derivado del empuje del viento sobre las palas.

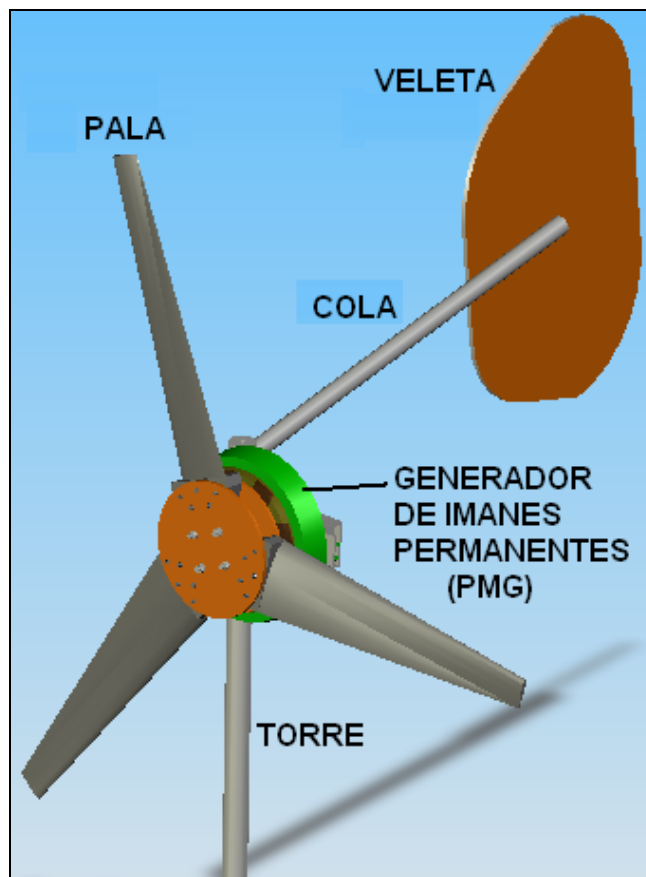


Fig. 3.1. Partes de un aerogenerador de baja potencia de imanes permanentes



3.1. El generador de imanes permanentes (PMG)

El generador de ITDG se muestra desensamblado en la Fig. 3.2:

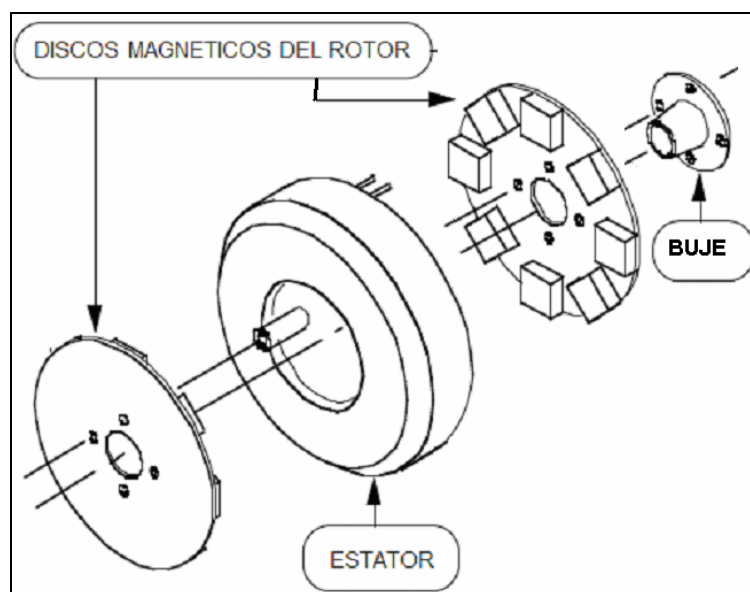


Fig. 3.2. El pequeño generador PMG de ITDG. [6]

Los dos discos del rotor están montados sobre un eje de cojinetes gracias a un buje, para que puedan rotar sobre el eje. Los rotores magnéticos están conducidos directamente por las palas del aerogenerador. Casi cada pequeño aerogenerador del mercado utiliza un PMG (Permanent Magnet Generator). Están diseñados especialmente con el propósito de extraer potencia del giro lento de las palas con la mejor eficiencia, el mínimo coste y la mínima complejidad.

Entre los dos discos del rotor hay un estator, encastado con resina plástica, que contiene las bobinas de alambre de cobre. Muchos otros PMG's utilizan núcleo de acero laminado para el estator. El PMG de ITDG se construye utilizando en lo posible, materiales disponibles propios. Se puede construir en un modesto taller que tenga el equipo de ingeniería básico con las herramientas que se enumeran en el Anexo D.

La electricidad se genera por el giro de los imanes de los discos magnéticos al girar a un y otro lado de las bobinas encastadas en el estator.

El campo magnético induce tensión en las bobinas, tensión que ha de permitir alimentar una batería. A velocidades de giro bajas la tensión es insuficiente para cargar la batería, pero cuando se alcanza un cierto umbral en la velocidad del viento, se establece una corriente eléctrica que permitirá la carga de la batería.



El generador produce corriente alterna AC, las bobinas están dispuestas en tres fases para hacer más eficiente el uso del espacio disponible y que, a la salida del rectificador la tensión de la corriente continua sea lo más lisa posible. A continuación se describen más detalladamente la composición y funcionalidad de cada elemento componente del generador.

3.1.1. Estator

El estator en sí mismo consiste en un elemento circular sólido (ver Fig.3.2) que contiene seis bobinas equidistantes en su interior. Es fruto de un encastamiento de resina con catalizador y talco, en moldes de madera. Para reforzar el encastamiento, el estator contiene incrustadas tiras rectangulares y circulares de fibra de vidrio en la resina, de manera que la fibra de vidrio con resina en su interior, rodea al encastamiento de bobinas.

El posicionamiento de las bobinas, queda determinado por la propia forma del estator. El estator tiene forma de anillo, de tal modo que todas las bobinas distan de su centro al centro del estator unos 125 mm.

Las bobinas

Cada una de las bobinas consiste en un enrollado de 100 vueltas de hilo de cobre esmaltado de diámetro 1,5 mm, de dimensiones 110 x 110 mm (forma aproximada de cuadrado), un agujero cuadrado interior de 50 x 50 mm y un espesor de 13 mm. Es importante que sea cobre con capa de esmalte que aisle cada espira (vuelta) de la bobina y el fenómeno de inducción magnética sea óptimo.

Los extremos de las bobinas van soldados a 12 cables de cobre del mismo diámetro que sobresalen del encastamiento del estator para realizar la conexión eléctrica deseada de las bobinas.

3.1.2. Rotores magnéticos

El rotor (cualquiera de los dos) del aerogenerador consiste fundamentalmente en un disco de acero al que se le pegan 8 imanes de Neodimio (NdFeB) equidistantes, encargados de crear la variación de campo magnético al girar solidarios al rotor (ver Fig. 3.3). Para que el disco y los imanes formen una sola estructura, se crea un encastamiento de resina que pegue y a la vez contenga a los imanes en el disco de acero y finalmente se refuerza este encastamiento con tiras de fibra de vidrio en el interior y con alambre de acero inoxidable alrededor para evitar que se desenganchen los imanes debido a la fuerza centrífuga que tendrán que soportar.



Los dos rotores se diferencian en la colocación de los imanes como se verá más adelante, quitando esta excepción, son exactamente iguales.

El disco de acero

Cada rotor magnético está constituido por un disco de acero de 305 mm de diámetro, de 6 mm de grosor, y un agujero central de 65 mm de diámetro. Es importante el hecho de que éste disco, encargado de sujetar los imanes, no esté hecho de aluminio o acero inoxidable sino de acero normal (material magnético).

Los imanes

Los 8 imanes o bloques magnéticos que lleva cada rotor, son bloques de Neodimio (NdFeB) premagnetizados, de 50x50x20 mm, y van colocados planos sobre el disco de acero. Cada imán tiene un polo norte y un polo sur. La polaridad de un imán está distribuida tal como se indica en la Fig. 3.3 Y en cada disco magnético está distribuida de manera diferente.

- Colocación de los imanes:

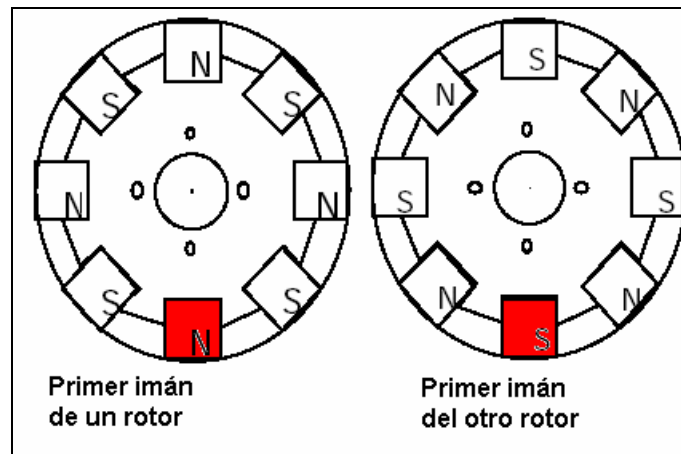


Fig. 3.3. Los dos rotores son diferentes. [6]

El alambre de acero inoxidable

La fuerza centrífuga debida al giro del generador puede expulsar los imanes del encastramiento. Tal como se indica en el manual de construcción del generador, la resina (que no es suficiente para sostener los imanes) se refuerza con alambre, que se enrolla alrededor del exterior de los rotores magnéticos para sujetar los imanes dentro del encastramiento. Para evitar fugas magnéticas se utiliza acero inoxidable.



3.1.3. El buje

Para la sujeción del generador a la estructura principal, y mantener el movimiento de rotación, se utiliza un buje de coche. Este proyecto, se ha realizado con el buje del eje trasero de un SEAT Ibiza, por tanto el diseño de los agujeros del rotor y de los elementos de ensamblaje del conjunto (tuercas, tornillos, varilla roscada) se han tenido en cuenta a partir de conocer el buje.

Un parámetro importante de este buje es que en su collarín tenga 4 agujeros de diámetro 10mm equidistantes sobre un diámetro de 102mm (ver la Fig. 3.4).

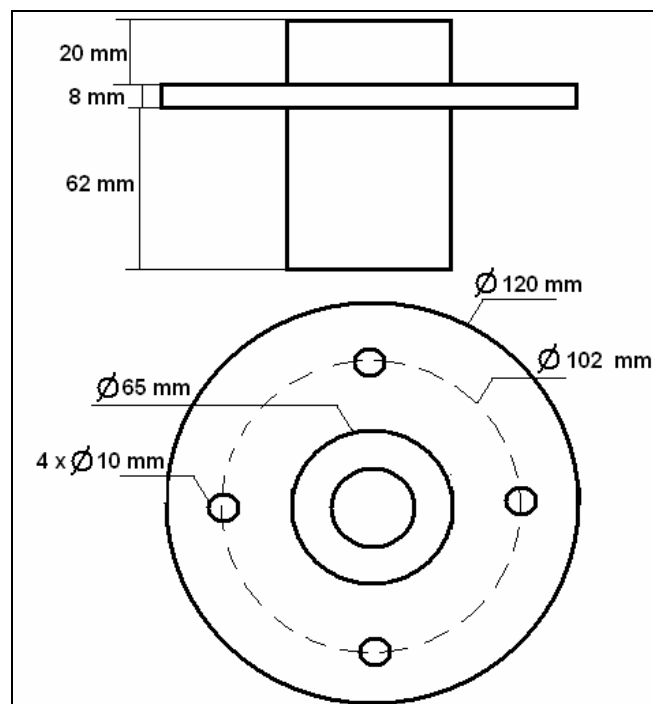


Fig. 3.4. Dimensiones características de un buje de la rueda de un SEAT Ibiza.

El buje encaja sobre el eje por medio de dos cojinetes cónicos que vienen ya incorporados, uno más grande en la parte inferior del eje y otro menor en la parte superior, que permiten el movimiento libre de giro del buje con los rotores incorporados sobre el eje.

Además de disponer de estos cojinetes, el buje también incorpora: el propio eje y una tuerca M15, una cupilla que sirve de pasador de cierre y un guardapolvo para no dejar entrar suciedad a los cojinetes.



3.1.4. El eje

El eje del Generador, es un elemento fundamental del conjunto del generador ya que sobre el eje va montado el buje y sobre éste los dos rotores. El eje es la pieza de acero que se observa en la Fig. 3.5.

Esta pieza se ajusta a la montura del buje permitiendo que ésta sea el soporte del generador y a la vez permita el giro del buje (con los rotores) montado al eje sobre cojinetes que permiten el giro del buje.

No hace falta construir el eje, ya que viene incorporado al buje, de manera que al disponer de un buje de SEAT Ibiza, ya se dispone de su eje correspondiente de acero, perfectamente conformado como se observa en la siguiente figura:

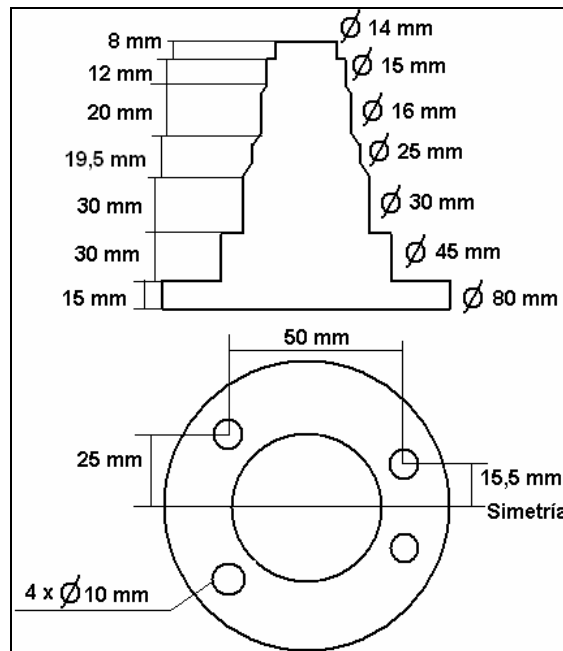


Fig. 3.5: Eje de un buje de SEAT Ibiza.

3.1.5. El montaje eléctrico

Es fundamental un soporte eléctrico para el funcionamiento del aerogenerador. Como ya se ha comentado, el funcionamiento del aerogenerador consiste en que la fuerza del viento hace girar la turbina eólica (las palas) que al estar montada solidaria a los discos del rotor, los hace girar. Al girar los rotores, como éstos contienen imanes, lo que se consigue es que el campo magnético que hacen los imanes, varíe. La variación de campo magnético induce corriente alterna en las bobinas del estator que está en medio de la variación de campo magnético.



Para aprovechar la inducción de corriente producida en el estator, lógicamente son necesarios una serie de elementos eléctricos que hagan que la corriente inducida en las bobinas sea transportada, transformada y controlada de manera correcta. Estos elementos eléctricos van conectados a la salida del estator sobre un disipador de calor que se atornilla sobre la montura del aerogenerador. Así pues, en este apartado del manual se describen los elementos eléctricos y también las conexiones a realizar para que funcione el sistema.

Elementos eléctricos

- El rectificador trifásico necesario para pasar de corriente alterna trifásica que se obtiene en la salida del cableado de las bobinas del estator a corriente continua que se desea tener en la entrada de la batería que se conecte, está formado en este caso por dos rectificadores de puente monofásicos de 30 A, 400 V que se conectan a las bobinas de tal modo (como se indica en el montaje eléctrico del Anexo F) que equivalen a un solo rectificador trifásico.



Foto 3.1: Dos rectificadores monofásicos de puente. [6]

- Ambos rectificadores van montados gracias a una tuerca y un tornillo en cada rectificador, sobre un Disipador de Calor que como su propio nombre indica disipa el calor que se genera como pérdidas de potencia por efecto Joule en éstos.

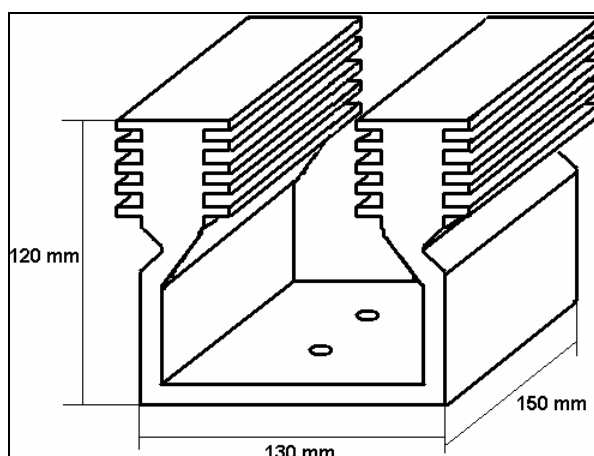


Fig. 3.6. Disipador de calor de aluminio.



- Las conexiones entre las bobinas, las conexiones de éstas a los rectificadores y las conexiones de los rectificadores a la batería, se llevan a cabo enrollando extremos de cable flexible unipolar de 1,5 mm de diámetro, tomando como elementos de unión los bloques conectores de una regleta estándar.

Conexión de las bobinas a los rectificadores

Para la conexión definitiva del generador hay que tener en cuenta varias opciones. Para bajas velocidades del viento es ideal la conexión de las bobinas en **estrella** y para velocidades elevadas del viento y por tanto más corriente de salida es necesario conectar las bobinas en **triángulo**. No obstante, la conexión concreta que se realiza es la siguiente:

➤ Conexión Doble-Estrella

La conexión entre las 6 bobinas que se tiene en cuenta en el aerogenerador de este proyecto es la conexión Doble-Estrella. Así pues están conectadas las bobinas en fase en paralelo entre ellas y en estrella las parejas, tal y como se muestra en la Fig. 3.7.

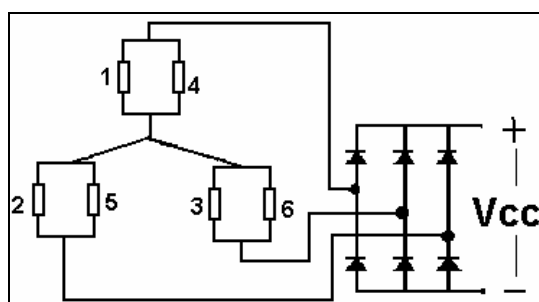


Fig. 3.7. Esquema eléctrico de la conexión en doble-estrella de las bobinas.

Las 3 fases existentes son: bobinas 1 y 4 en fase, bobinas 2 y 5 en fase, y bobinas 3 y 6 en fase. La explicación es geométrica y se debe a que las bobinas opuestas sufren variaciones de campo magnético iguales en el tiempo.

Así pues en esta conexión se tiene que la bobina 1 está conectada en paralelo con la 4, la 2 en paralelo con la 5, la 3 en paralelo con la 6, y estas tres ramas que se obtienen se conectan en estrella a los 2 rectificadores.



Otras posibles conexiones

➤ Conexión en estrella

La conexión en estrella simple, es aconsejable cuando se tengan velocidades del viento bajas que hagan girar el generador hasta velocidades no superiores a 250 rpm. Las bobinas en fase se conectan en serie entre ellas. Es decir, se conecta la bobina 1 en serie con la 4, la bobina 2 en serie con la 5 y la bobina 3 en serie con la 6, y seguidamente se conectan las tres ramas en estrella a los rectificadores.

➤ Conexión en triángulo

La conexión en triángulo es aconsejable cuando se tengan velocidades del viento altas que hagan girar el generador como mínimo a velocidades superiores a 250 rpm. De igual modo que sucede con la conexión en estrella simple, se conectan las bobinas en fase en serie en parejas y las 3 ramas que se obtienen se conectan en triángulo obteniendo 3 tensiones que se conectan a los rectificadores.

➤ Relé para intercambiar entre estrella y triángulo

También es posible instalar un relé que se encargará de cambiar las conexiones de estrella simple a triángulo y al revés como se quiera en cada momento. Para realizar esta conexión hace falta además un relé 3pole c/o (3P2T) y un interruptor. Se conectan las bobinas en fase en serie tal y como sucede en la conexión en estrella simple y en la conexión de las bobinas en triángulo, y sobre el relé se realizan las conexiones indicadas en la Fig. 3.8:

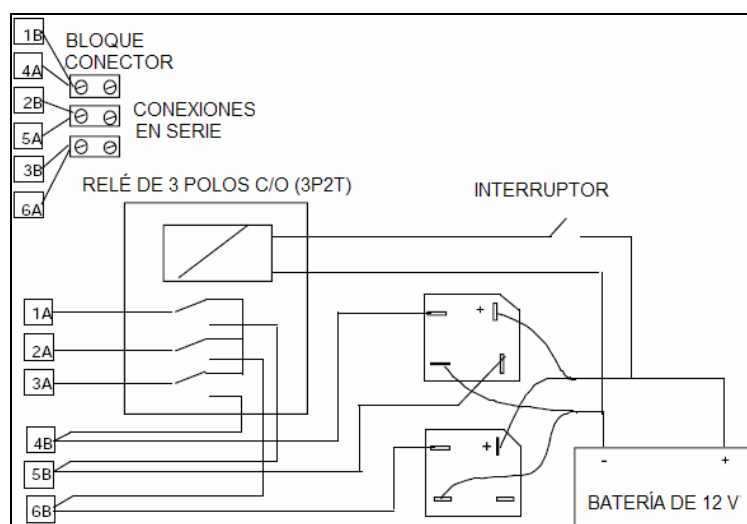


Fig. 3.8. Uso de un relé para cambiar entre estrella y triángulo. [6]



3.2. El rotor eólico

3.2.1. Introducción

Los rotores modernos de aerogeneradores generalmente tienen dos o tres palas. Un gran número de palas creará más fuerza de giro, pero no sería capaz de hacer girar el PMG lo suficientemente rápido para generar la tensión requerida, porque giraría más lento. Las palas del rotor y el PMG están diseñados muy cuidadosamente para combinar la velocidad y la potencia, para extraer el máximo de energía del viento. [6]



Foto 3.2. Turbina eólica de 1,7 m de diámetro, de 3 palas. [8]

Si el PMG no está conectado a una batería o a otra carga eléctrica, entonces las palas se sobreacelerarán. La máquina empezará a hacer ruidos y puede que vibre tanto que las partes se separen y caigan al suelo. Para evitar este tipo de problema, son importantes los siguientes aspectos:

- Mantener conectado el aerogenerador a una carga siempre.
- El aerogenerador debe tener un sistema de orientación (o viraje) para vientos elevados.
- Las palas deben estar precisamente equilibradas para que funcionen con suavidad.

Dos posibles diseños para el rotor eólico

En este apartado se muestran los dos diseños de rotor eólico más utilizados para este tipo de aerogeneradores. El perfil NACA 4412 usado en Perú por Teodoro Sánchez y el perfil K2 utilizado en Sri Lanka por Sunith Fernando. Para tener una primera idea de la sección de los perfiles, se muestra la siguiente figura:



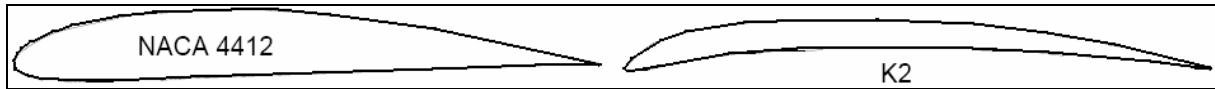


Fig. 3.9. Perfiles de palas [7]

Las características que diferencian y determinan el diseño de un rotor eólico son:

País de Origen	Perú	Sri Lanka
Diseñador	Teodoro Sánchez	Sunith Fernando
Perfil de la pala	NACA 4412	K2
Diámetro	1.7 metros	2.0 metros
Ratio máximo de velocidad exterior (λ_0)	5	6
Número de palas	3	2

Tabla 3.1. Características de las palas [7]

- **Sección:** Es la forma de la pala en la sección representativa (corte a 90 grados). La pala de sección NACA 4412 está pensada para hacerse con dos láminas de fibra de vidrio espaciadas. La pala de perfil K2 puede ser fibra de vidrio con resina.
- **Diámetro:** Cuanto más largas sean las palas, mayor superficie de contacto con el viento, y por lo tanto se producirá mayor potencia con la misma velocidad del viento.
- **Ratio de velocidad exterior (λ):** Es la velocidad a la que va el extremo de la pala en comparación a la velocidad del viento. La velocidad de giro del eje del generador (velocidad del conjunto rotor), dependerá del ratio de velocidad y del diámetro, de manera que se puede calcular como el producto de la velocidad del viento por el ratio de velocidad exterior dividido por el diámetro del rotor eólico.

A continuación se muestra un gráfico dónde se observa una comparativa de la potencia frente a la velocidad de giro del generador, para los dos casos de rotor propuestos. Se tienen en cuenta, tanto potencias necesarias para hacer girar a determinadas velocidades, cómo las potencias que ofrecen cada rotor eólico.



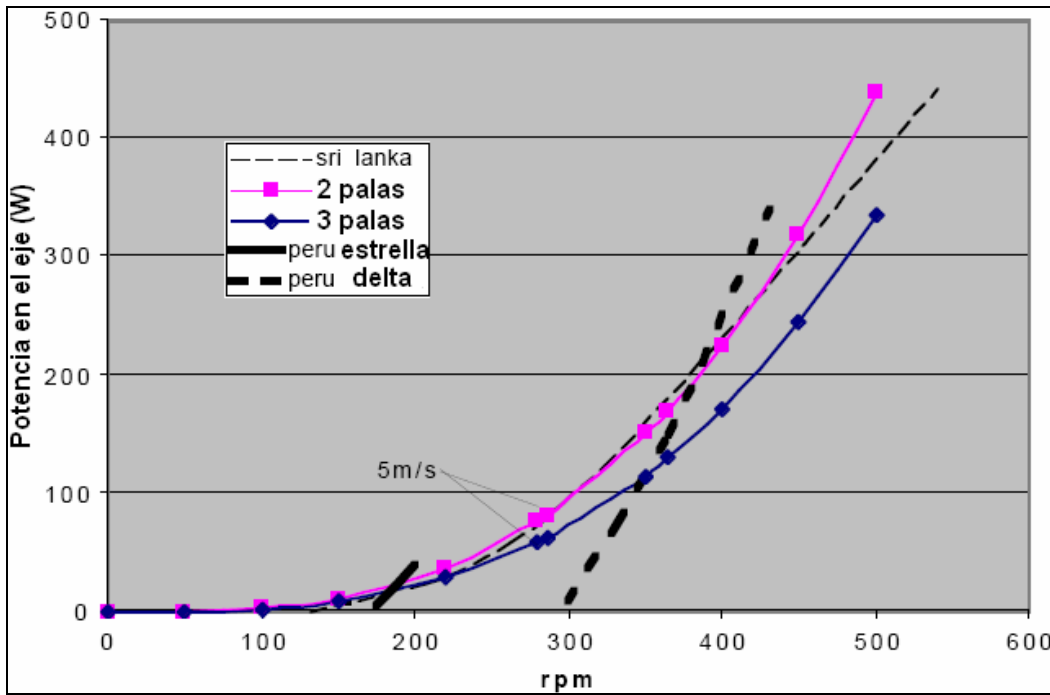


Gráfico 3.1. Potencia frente a velocidad de giro del generador. [7]

Cada rotor está diseñado cuidadosamente para trabajar correctamente con el Generador de Imanes Permanentes (PMG) usado en cada país. El PMG usado en Perú tiene unos imanes más gruesos y una forma distinta de conectar las bobinas. Es decir, que los aerogeneradores de Perú y Sri Lanka, no sólo se diferencian en el perfil de las palas, si no en el diseño de sus respectivos generadores.

El gráfico muestra cuánta potencia se necesita para hacer girar los generadores en Sri Lanka (línea discontinua) y en Perú (dos curvas para dos conexiones). El rotor de 2 palas (violeta) diseñado en Sri Lanka produce exactamente la potencia requerida por el generador utilizado en Sri Lanka. El rotor de 3 palas (azul) de Perú está diseñado para compaginar (adaptar) los dos casos diferentes para el generador de Perú: conectado en estrella y conectado en triángulo.

A velocidades del viento de 5m/s, los rotores eólicos producirán 80 y 60 W de potencia mecánica respectivamente para unas velocidades de giro de 286 y 280 rpm respectivamente. Este punto está marcado en cada curva. La velocidad del rotor eólico depende de cómo este cargado. Si el PMG está desconectado de la batería, el rotor estará descargado y girará mucho más rápido. Hay que intentar evitar que gire el rotor descargado, porque es ruidoso y estresante.



3.2.2. Rotor eólico del IT-100

El rotor eólico que se acoplará a este generador será el diseñado por Teodoro Sánchez en Perú. Es decir que el rotor eólico tendrá las siguientes características:

Pala

Perfil:	NACA 4412
Longitud:	0,7 m
Cuerda punta:	0,0685 m
Cuerda base:	0,1679 m
Peso (una pala):	0,78 kg
Material:	Madera de Pino

Rotor eólico

Número de palas:	3
Diámetro rotor:	1,7 m
Área:	2,27 m ²
Dirección de rotación:	sentido horario
Orientación:	barlovento

La cuerda, como se comenta más adelante es la distancia en una sección determinada de la pala, que hay desde un extremo al otro. La colocación de las palas es tal, que la orientación es a barlovento y el sentido de rotación es horario (ambos aspectos se pueden observar más claramente en el manual del Anexo F).

Cabe resaltar, que el manual del Anexo F contempla la construcción de las palas definitivas de madera. Pero en el Anexo C se describe cómo continuar el proceso completo si se desean construir más aerogeneradores en serie de éste tipo, aprovechando las palas de madera como patrones para construir moldes, y con éstos, construir palas de resina y fibra de vidrio.

3.2.3. Las palas

Dimensiones características del perfil de la pala

Las dimensiones características de una pala están definidas según estaciones. Cada estación constituye una sección transversal de la pala (ver Fig. 3.10.), y lleva asociada un número (número de la estación). Así se consigue caracterizar una pala sólo con determinar las dimensiones características de un número acotado de estaciones (secciones):



- El radio local, el cual es la distancia de la estación al centro del rotor.
- La anchura de cuerda, que es la anchura de la pala de un extremo al otro en una estación determinada. La línea de cuerda es la línea más larga dentro de la sección de la pala, y es la que une el borde principal o de ataque con el borde posterior o de fuga.
- El ángulo de la pala (beta), que es el ángulo entre la línea de cuerda de una estación determinada y el plano sobre el que gira el rotor.

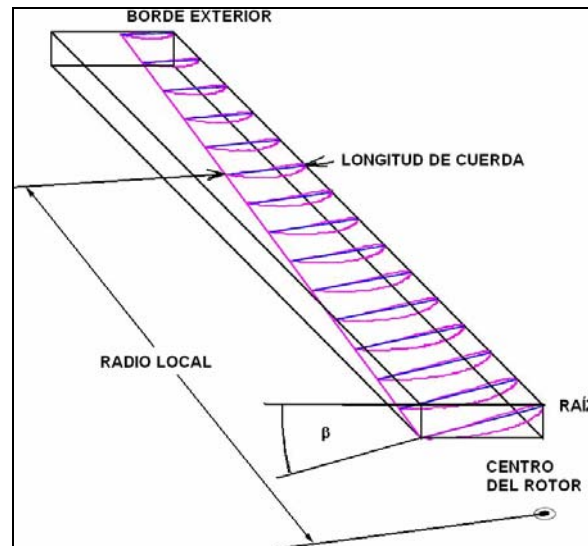


Fig. 3.10. Parámetros característicos de la pala. [7]

Por último hay que decir, que el extremo de la pala más próximo al centro del rotor en la raíz, la forma de la pala debe cambiar con suavidad de sección de una ala a una forma que permita el ensamblaje sobre el rotor del generador. Esto se verá posteriormente.

El extremo raíz

El extremo raíz es idéntico en cada pala y es necesario para ajustar cada pala al rotor del generador. Es por eso que las palas tienen dos partes, una primera que es perfil de ala de la pala que es la parte que capta la energía eólica, y una segunda parte en el extremo grueso donde se produce una suave transición entre el final del perfil de ala hacia la forma del extremo raíz.

Este extremo raíz, no incluido en la longitud de la pala, consiste en un bloque de madera (extremo de la misma pieza que el resto de la pala) que tiene las dimensiones indicadas:



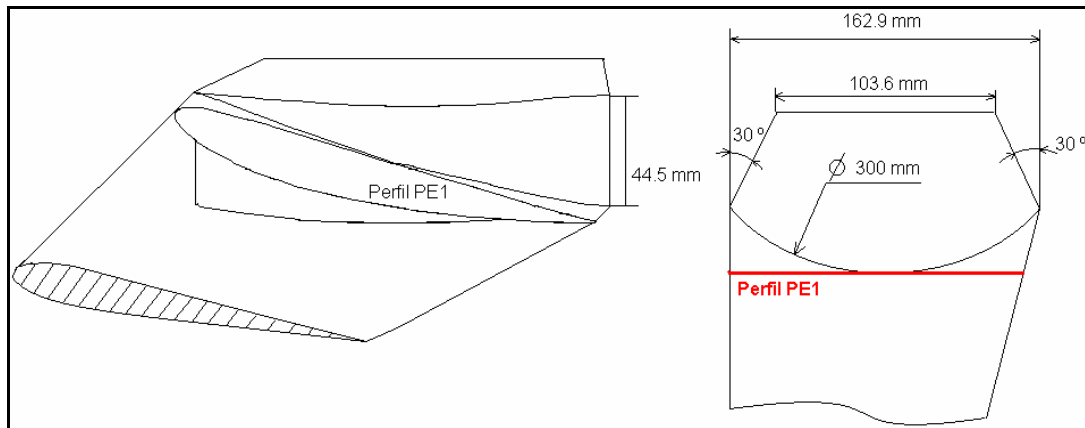


Fig. 3.11. Extremo raíz de una pala. [7], elaboración propia.

Resistencia de las palas

Es posible calcular si las tensiones en la superficie de la madera son seguras o no. Se necesita tener un margen de seguridad para tener en cuenta eventos inesperados y la propia fatiga.

Los principales esfuerzos en las palas de una pequeña turbina eólica se presentan como fuerzas centrífugas. La fuerza centrífuga en las palas, cuando éstas están girando a velocidad máxima (aproximadamente 500 rpm) será aproximadamente 100 veces el peso de la pala. Si la pala pesa 0'78 kg, entonces, la fuerza centrífuga estará sobre 0,8 kN (equivalente a 80 kg de peso) a esta velocidad. A 1000 rpm la fuerza será equivalente a 320 kg. Esta velocidad podría presentarse si el sistema de giro de la cola no trabaja correctamente. [7]

Estos esfuerzos debidos a la fuerza centrífuga suponen a la pala un esfuerzo de tracción axial que en el caso más desfavorable de 1000 rpm supone un esfuerzo de 3136 N (320 kp), por tanto la sección media de la pala (que se deduce observando los cálculos realizados en el subapartado G.1.2 del Anexo G., es de 11,575 cm²) soporta tensiones de 2,7 MPa, un valor aproximadamente la mitad de la tensión que soporta la madera de pino a tracción axial (entre 5 y 6 MPa).

El viento realiza una fuerza de empuje en cada pala, de 50-100N (5-10 kg) [7]. La fuerza de empuje supone un esfuerzo de flexión sobre la pala, de manera que la tensión que se alcanza teniendo en cuenta la sección media de la pala será de 0,09 MPa mientras que la tensión de flexión paralela que puede soportar la madera de pino es del orden de 9 MPa.



3.2.4. Los discos del rotor

Las palas no van ensambladas directamente sobre la parte frontal del rotor de imanes, porque las fuerzas de inercia de las palas crearían tensión en el rotor de imanes y harían que los imanes golpearan al estator. Para evitar esto, se ensamblan las palas al generador con la ayuda de 2 discos de madera que hacen un “sándwich” con las palas.

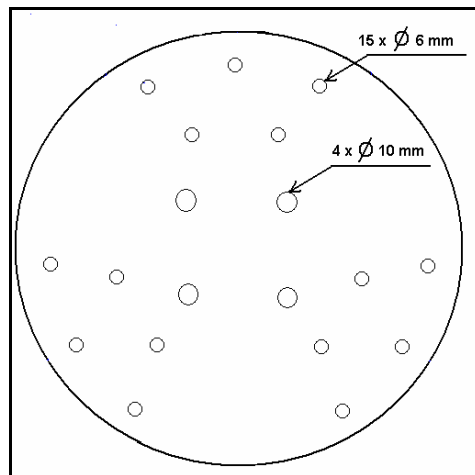


Fig. 3.12. Uno de los discos del rotor eólico.

Los dos discos conteniendo las 3 palas ajustadas a ellos a 120 ° cada pala (ver Fig. 3.13), se ajustan directamente sobre los Clavos del Rotor que sobresalen por la parte frontal del rotor frontal.

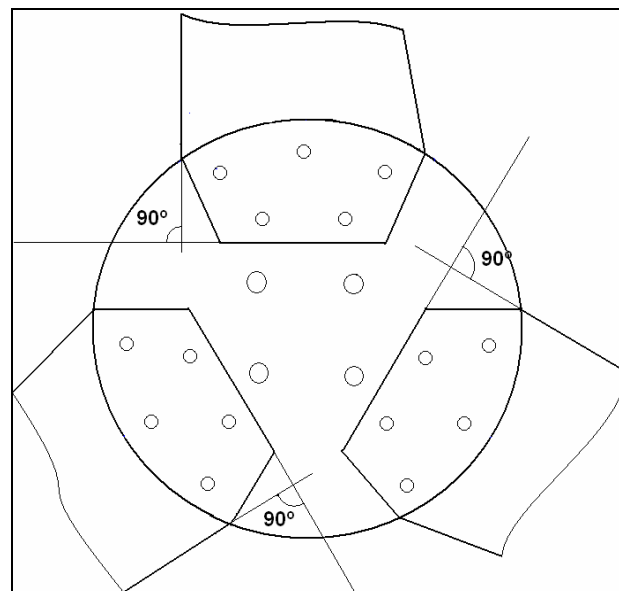


Fig. 3.13. Posición de las palas sobre un disco del rotor eólico.



3.3. La montura del aerogenerador

La montura del aerogenerador es una pieza de acero sobre la cual va montado el generador con el rotor eólico incluido por un lado, quedando fijado el estator y permitiendo el giro de los rotores. Por otro lado, la montura tiene la parte interior de la bisagra de cola que forma parte del mecanismo de orientación y viraje del aerogenerador; sobre esta parte interior de la bisagra de cola que es un saliente de la montura, va montada la cola del aerogenerador con la veleta.

La veleta es la encargada de llevar a cabo el sistema de protección de sobre-velocidad. El mecanismo empleado será un mecanismo de viraje tanto del generador como bloque solidario a la montura de éste, como de viraje de la cola; funciona aprovechando el equilibrio entre la fuerza de empuje del viento (por un lado sobre las palas y por otro sobre la veleta de la cola) y la fuerza de la gravedad que supone el peso de la cola.

La montura del aerogenerador comprende varios elementos (ver Fig. 3.14). Estos elementos son: la montura del buje, los soportes del estator, el tubo de viraje (con su tapa) y la parte interna de la bisagra de la cola.

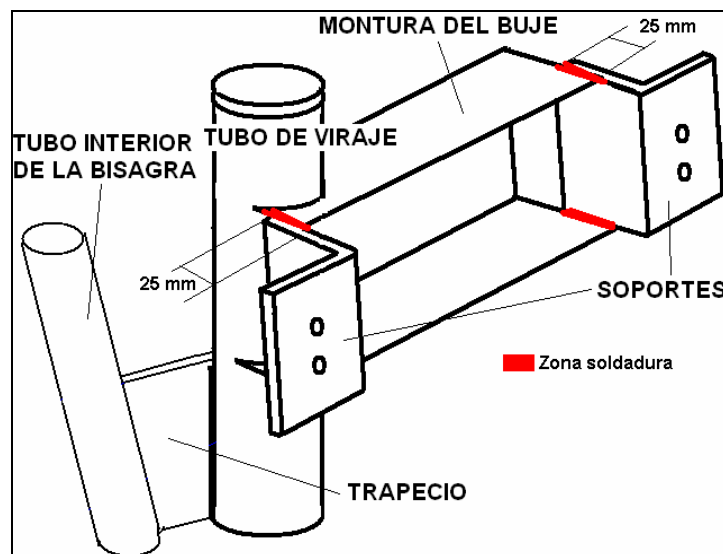


Fig. 3.14. Montura del aerogenerador. [9], elaboración propia.

Todos estos elementos que forman la montura van soldados. La montura del buje lleva soldados en sus extremos los soportes del estator. Además el tubo de viraje lleva soldada la parte interior de la bisagra de cola y estos dos elementos (tubo y bisagra interna) van soldados en un extremo de la montura del buje consiguiendo una única pieza sólida preparada para encajar todos los elementos comentados en el primer párrafo.



3.3.1. Montura del buje

La montura del buje es la pieza formada por dos ángulos de acero (100 mm de longitud y una ala de 50x50 mm y 6 mm de espesor) que van soldados formando un bloque donde se ajusta el eje atornillado en los agujeros de la Fig. 3.15:

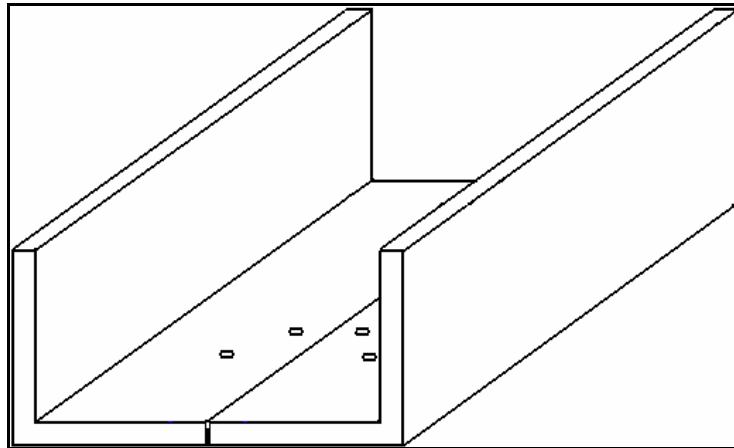


Fig. 3.15. Montura del buje, como unión de dos ángulos. [9], elaboración propia.

Al ir soldado en un extremo el tubo de viraje tiene unos cortes circulares (ver Fig. 3.16).

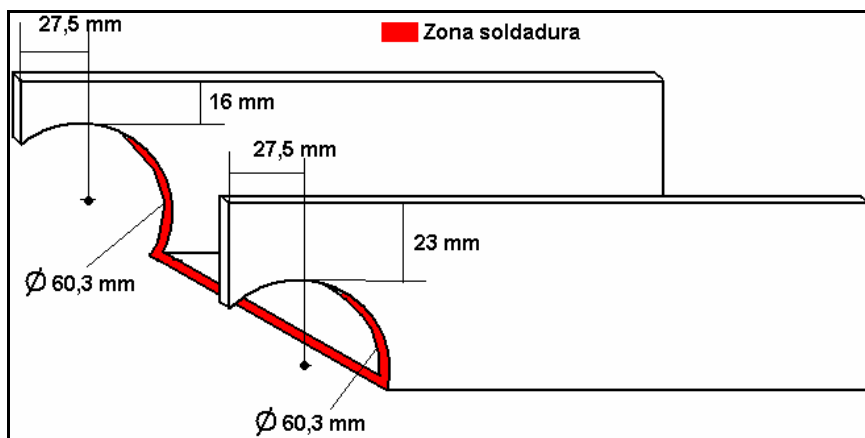


Fig. 3.16. Forma final de la montura del buje. [9], elaboración propia.

Pero como se observa, los cortes no están hechos a la misma distancia, consiguiendo con los cortes que al montar la montura del buje con el tubo de viraje vertical, se consiga obtener el ángulo β de 4 grados (ver Fig. 3.17) de inclinación de la montura del buje respecto la vertical para dejar un mayor margen entre los extremos de las palas y la torre.



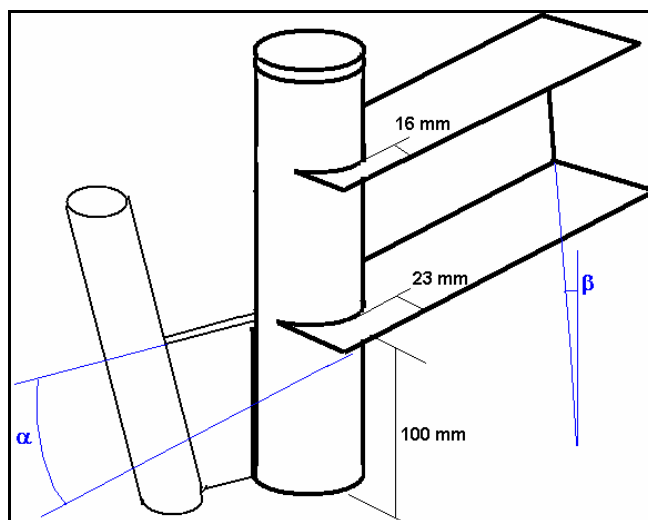


Fig. 3.17. Unión con ángulo α de la montura del buje al tubo de viraje con la bisagra ya incluida. [9], elaboración propia.

3.3.2. Soportes del estator

Los soportes del estator son dos piezas de acero con forma de ángulo (igual que las piezas anteriores pero difiriendo la longitud). Se trata de dos piezas de 100 mm de longitud, un espesor de 6 mm y un ala de 50 x 50 mm.

Estos soportes van soldados a la montura del buje (ver Fig. 3.14) y su función es hacer de soportes del estator, de manera que estos soportes disponen de agujeros para que pasen a través de ellos los clavos del estator y se ajuste éste a la montura del aerogenerador.

3.3.3. Tubo de viraje

El tubo de viraje es la pieza central del aerogenerador, ya que se encaja sobre la torre, y aguanta por un lado toda la montura del buje con el generador y las palas, y por otro lado aguanta la bisagra interior de la cola y toda la cola con la veleta. Consiste en una pieza tubular de 300 mm de longitud con un diámetro exterior de 60,3 mm y un espesor de 3 mm.

El tubo de viraje lleva incorporada una tapa que tiene como función evitar que entre suciedad en el interior del tubo de viraje, y por tanto en el interior de la torre y además para guiar el cableado que viene del generador hacia el interior del tubo y por tanto hacia el interior de la torre que sirve de guía del cableado hasta el suelo.



3.3.4. Parte interna de la bisagra de la cola

La bisagra de la cola, como se comenta en la lista de materiales, sirve como elemento de unión del aerogenerador (ya que la bisagra se suelda al tubo de viraje) con la cola de la veleta. La parte interna de esta bisagra está formada por la unión por soldadura de dos piezas obteniendo la pieza mostrada en la Fig. 3.18.

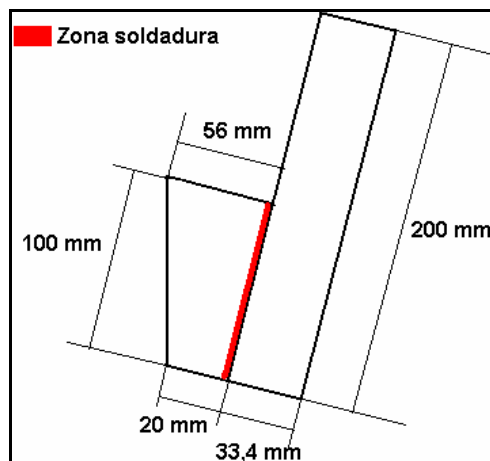


Fig. 3.18. Parte interna de la bisagra de la cola. [9], elaboración propia.

3.4. Cola del aerogenerador

La cola de veleta se usa para encarar la máquina en el viento. Forma parte de un mecanismo que hace girar el generador y las palas fuera de toda la fuerza del viento, girando toda la máquina sobre un cojinete (que no es otra cosa que el tubo de viraje) en el extremo superior de la torre. Un mecanismo simple en la cola de veleta (bisagra de la cola) aprovechando la gravedad mantiene el generador y las palas encarando al viento cuando el viento es moderado, pero se gira de lado con vientos muy fuertes. El sistema es esencial para proteger las palas de sobreaceleraciones y el PMG de estropearse. Hay varios mecanismos similares que pueden utilizarse para orientar la máquina de este modo.

3.4.1. Cola

La cola se compone fundamentalmente de dos piezas tubulares soldadas (ver Fig. 3.19). La primera de ellas es el tubo exterior de la bisagra de la cola, y encaja con libertad de giro sobre el tubo interior de la bisagra. La segunda es la botavara del aerogenerador. Tiene un corte en un extremo para ir soldado correctamente a la parte exterior de la bisagra y un corte en el otro extremo para ir soldado a una pequeña barra de acero que sujete la veleta.



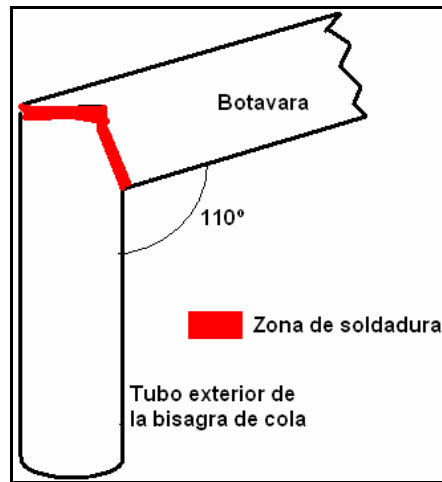


Fig. 3.19. Unión de la botavara al tubo exterior de la bisagra. [9], elaboración propia.

3.4.2. Veleta

La veleta, consiste en una pieza de madera contrachapada de 10 mm de grosor con la forma mostrada en la Fig. 3.20 que se asemeja a un trapecio regular. Va montada sobre la botavara con tres tornillos, uno de ellos directamente une la veleta a la botavara y los otros dos unen la veleta a una pequeña barra de acero que va soldada al extremo preparado para ello de la botavara.

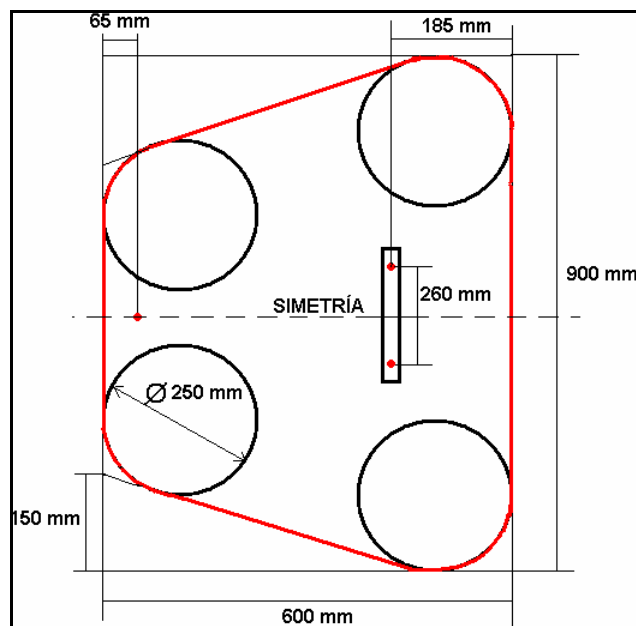


Fig. 3.20. Forma de la veleta y posición de los agujeros. [9], elaboración propia.

El viento actúa sobre su superficie consiguiendo que esté siempre prácticamente orientada en la dirección del viento.



3.5. La estructura (torre)

El diseño escogido ha sido el de torre tubular con tensores abatible, no sólo por cuestiones estéticas sino también por las ventajas que reporta en temas de seguridad y facilidad de montaje. El sistema de torre para miniturbinas ofrece el mejor compromiso entre el precio, la fiabilidad y la facilidad de instalación. El sistema se basa en una torre flotante y tornillos de anclaje, no siendo necesario excavaciones ni bases de hormigón. Cada sistema de torre incluye los cables, los tornillos de anclaje y la barra de izaje (la torre propiamente dicha).

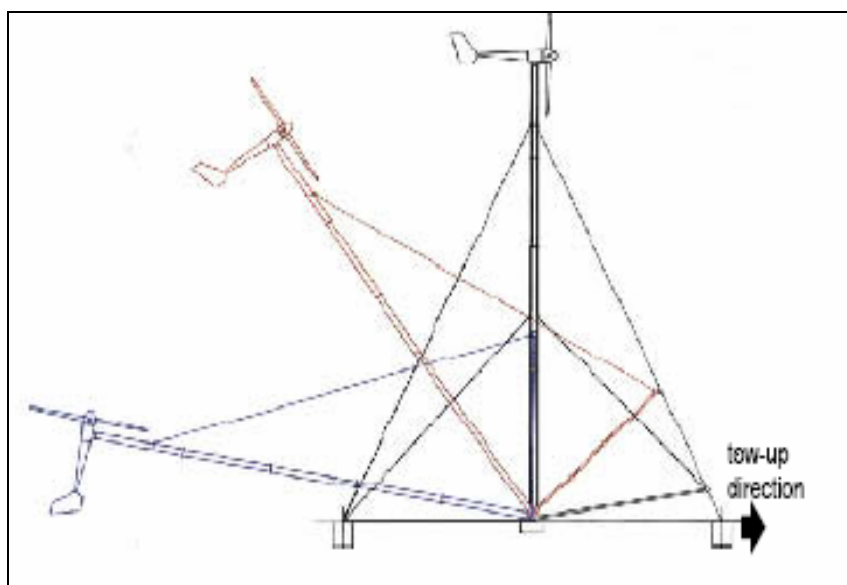


Fig. 3.21. Torre con cables y tensores. [8]

La torre eleva al generador, las palas y la cola de veleta a una altura donde el viento es más fuerte y tranquilo que a nivel del suelo. La torre de este aerogenerador mide 6 m de alto, tiene un diámetro exterior de 54 mm y un espesor de 4 mm. La altura es la necesaria para estar por encima de todos los obstáculos de los alrededores. Los árboles y edificios afectarán al viento a una altura casi el doble que la propia (de árboles y edificios), pero consideraciones prácticas como el coste, la seguridad y el mantenimiento limitan la altura.



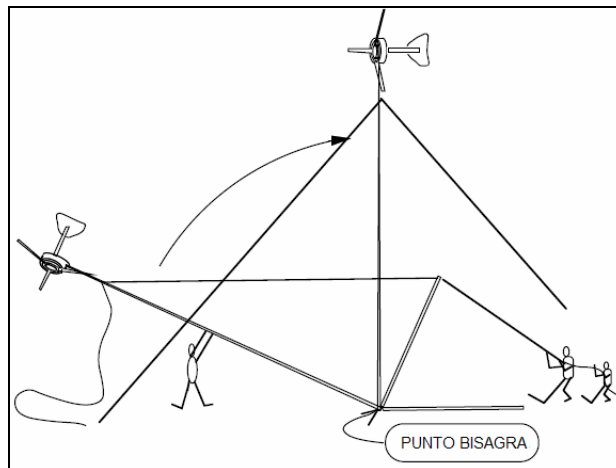


Fig. 3.22. Elevación de una torre. [8]

Las torres más simples, como es nuestro caso, son de tuberías de acero, puestas verticalmente por dos o tres cuerdas tirantes. Los tirantes son anclados en el suelo firmemente, pero la base de la torre es generalmente de bisagra para permitir bajar el generador para mantenimiento o reparación.



Foto 3.3. Levantado de una torre con palos y cuerdas en Perú. [8]

3.6. Ensamblaje del conjunto mecánico

Para poder comprender el ensamblaje, se recomienda recordar la Fig. 3.2.

Se puede observar más fácilmente como los dos rotores van ajustados al buje para girar solidarios a este. El buje con los rotores es un conjunto que irá encajado en el eje, permitiéndose el giro de este conjunto (rotores y buje). Mientras que el estator va atornillado a la montura del aerogenerador sobre los soportes del estator y durante el funcionamiento del generador se mantiene solidario a toda la montura del aerogenerador.



La manera de que el estator se encuentre entre los rotores magnéticos, no es otra que montar en primer lugar el rotor posterior sobre el collarín del buje a través de los clavos del rotor, a continuación el estator sobre sus soportes en la montura y pasando sin tocar su agujero central los clavos del rotor, quedando el estator a 1mm del rotor trasero. Seguidamente va encajado el rotor frontal sobre los clavos del rotor de manera que quede a 1mm de distancia del estator.

Sobre el rotor magnético frontal y a través de los clavos del rotor va montado el rotor eólico, de manera que se tiene un subconjunto mecánico de rotación que consiste en el buje, los 2 rotores magnéticos y el rotor eólico, todos éstos, elementos solidarios.

Los elementos rotativos del generador (buje y rotores) van montados por el buje con libertad de giro sobre el eje del generador gracias a los cojinetes. El eje conteniendo al conjunto buje-rotores, es a su vez es solidario a la montura del aerogenerador.

La montura del aerogenerador, conteniendo todo el generador con el rotor eólico incluido constituye un conjunto mecánico que tiene un grado de libertad. Este grado de libertad no es otro que el viraje respecto al eje de la torre (coincidente con el eje del tubo de viraje). Este viraje es el encargado de apartar el plano de las palas de la fuerza del viento cuando se tienen velocidades elevadas y entra en funcionamiento el sistema de orientación.

Finalmente simplemente va montada sobre la parte interna de la bisagra de cola de la montura, la cola con la veleta y con esto ya se dispone de todo el aerogenerador que va montado sobre la torre que va introducida en su extremo superior en el tubo de viraje de la montura del aerogenerador.



4. MATERIALES Y PESO DEL AEROGENERADOR

La lista de materiales hace referencia al conjunto de elementos que se utilizan en la construcción de un aerogenerador según el manual descrito en el anexo F. Es importante resaltar que se trata de construir un aerogenerador de baja potencia manufacturado. Además tiene como objetivo una finalidad de fondo social, y poder implantarse en poblaciones de poco nivel adquisitivo. Es por estas razones que se busca utilizar materiales que tengan la más alta relación calidad-precio, con precios asequibles en la medida de lo posible.

En este capítulo se pretende, determinar la cantidad de material de cada tipo que se necesita para construir un aerogenerador, así como las dimensiones y tipología de cada uno de estos materiales. Para conseguir esto, se indican las razones u orígenes de la demanda de cada material, es decir de que elemento mayor formarán parte.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del estudio de los materiales necesarios, realizado en el Anexo I, en la tabla 4.1.



MATERIALES	CANTIDAD NECESARIA	TIPO
GENERADOR		
ENCASTAMIENTO		
Resina con catalizador	2.450 g	Resina de poliéster con catalizador
Polvo de Talco	1.400 g	Talco Lavado
Fibra de vidrio	1 m ²	Rollo de 1m de ancho
ACERO		
Plancha de acero	2 discos de 305 mm de diámetro	espesor 6mm
Barra roscada M8	400 mm	M8
Barra roscada M10	960 mm	M10
Tuercas M10	44	hexagonal M10
Tornillos M10	4	M10 x 30
Tuercas M8	12	hexagonal M8
Arandelas M10	8(*)	Planas M10 (grosor de 0,5mm)
Tuercas M5	2	hexagonal M5
Tornillos M5	2	M5 x 25
ELEMENTOS ELÉCTRICOS		
Hilo de cobre esmaltado	170 m	Unifilar, diámetro 1,5 mm
Cable flexible	18 m	Unifilar de 1,5mm de diámetro
Bloques Magnéticos	16 bloques 50x50x20mm	Neodimio
Alambre de Estaño	150mm	Alambre Sn-Pb de 1,5mm
Rectificadores monofásicos	2	US1G (30A, 400V)
Disipador de Calor	1 de 250 g	Aluminio Negro Anodizado
Bloques conectores	1 regleta	longitud 10 cm
OTROS		
Alambre de acero inoxidable	10 m	diámetro 2mm
Buje	1 con cojinetes, tuerca, cupilla y guardapolvo	Buje trasero de SEAT IBIZA
Eje	1	Eje de Buje de SEAT IBIZA
Cinta adhesiva	216 cm	Tesa, blanca
ROTOR EÓLICO		
MADERA		
Tablas	3 piezas 780x165x45mm	Madera de pino
Plancha de madera	2 discos, diámetro 300 mm	Compuesto de 8 mm de grosor
ACERO		
Tornillos M6	15	6 x 70
Tuercas M6	15	hexagonal M6
Tuercas M10	4	hexagonal M10
MONTURA DEL AEROGENERADOR		
ACERO		
Tubo de 300 mm	1 tubo	D exterior 60,3mm, espesor 3 mm
Ángulos	2 ángulos de 305 mm	ala 50x50 mm, espesor 6 mm
Ángulos soporte	2 ángulos de 100 mm	ala 50x50 mm, espesor 6 mm
Anillo	1 anillo (tapa)	D 60,3 y 15mm, espesor 6 mm
Tubo de 200 mm	1 tubo	D exterior 33,4 mm, espesor 3 mm
Trapezio	1 pieza de 100 mm y ancho de 20 a 56 mm	Espesor 10 mm
COLA DEL AEROGENERADOR		
ACERO		
Tubo de 150 mm	1 tubo	D exterior 42,2 mm, espesor 3 mm
Tubo de 1200 mm	1 tubo	D exterior 42,2 mm, espesor 3 mm
Barra	1 pieza	300 x 30 x 8 mm
Tuercas M10	3	hexagonal M10
Tornillos M10	3	cabeza hexagonal, 10 x 60
MADERA		
Madera contrachapada	Trapezio de bases 900,600, altura 600mm	10 mm de espesor
MATERIAL DE SOLDADURA		
	1123 mm de varilla de Diámetro 3 mm	Varilla de acero al Níquel
ESTRUCTURA		
ACERO		
Tubo de 6 m	1 tubo	D. exterior 54 mm, espesor 4 mm
Cable 1x7, diámetro 6 mm	28 metros	Galvanizado, diámetro 6mm
Tensores	4	Para cable de diámetro 6 mm
Sujetacables y guardacabos	12 y 4 respectivamente	Para cable de diámetro 6 mm
Sujetacables y guardacabos	12 y 4 respectivamente	Para cable de diámetro 6 mm

Tabla 4.1. Lista de materiales del aerogenerador.



Para conocer el peso que debe soportar la montura del aerogenerador, así como el peso total del aerogenerador que debe resistir la estructura en forma de torre tubular con tirantes, se ha calculado el peso de todos y cada uno de los elementos constituyentes del generador. También se utiliza esta información para configurar la tabla 7.1, que contiene la energía incorporada a los materiales.

Seguidamente a modo de síntesis se puede observar la tabla 4.2 que muestran los resultados obtenidos en los cálculos del peso del aerogenerador que se detallan en el Anexo G.



MATERIALES	CANTIDAD Y/O DIMENSIONES	PESO (g)
GENERADOR		
ENCASTAMIENTO		
Resina con catalizador	2.450 g	2.450
Polvo de Talco	1.400 g	1.400
ACERO		
Plancha de acero	2 discos diámetro 305 mm, espesor 6mm	6.654
Barra roscada M8	400 mm	125
Barra roscada M10	960 mm	480
Tuercas M10	44	413
Tornillos M10	4 de M10 x 30 mm	91
Tuercas M8	12	75
Arandelas M10	8 de espesor 0,5 mm	8
Tuercas M5	2	3
Tornillos M5	2 de M5 x 25 mm	9
ELEMENTOS ELÉCTRICOS		
Hilo de cobre	170 m, diámetro 2,5 mm	2671
Cable flexible	6 m, diámetro 1,5 mm	83
Bloques Magnéticos	16 bloques 50x50x20mm de Neodimio	5920
Alambre de Estaño	150mm de 1,5 mm de diámetro	2
Rectificadores monofásicos	2	50
Disipador de Calor	1 disipador de 250 g.	250
Bloques conectores	1 regleta de 10 cm	32
OTROS		
Alambre de acero inoxidable	10 m de diámetro 2 mm	245
Buje con eje y accesorios	1 buje de SEAT IBIZA	2355
PESO DEL GENERADOR		23.316
ROTOR EÓLICO		
MADERA		
Tablas	3 piezas 780x165x45mm de madera de pino	2331
Plancha de madera	2 discos, diámetro 300 mm, espesor 8 mm	758
ACERO		
Tornillos M6	15 de M6 x 70 mm	246
Tuercas M6	15	30
Tuercas M10	4	38
PESO DEL ROTOR EÓLICO		3.403
MONTURA DEL AEROGENERADOR		
ACERO		
Tubo de 300 mm	1 tubo, diámetro exterior 60,3mm, espesor 3 mm	648
Ángulos	2 ángulos, longitud 305 mm, ala 50 mm, espesor 6 mm	2684
Ángulos soporte	2 ángulos, longitud 100 mm, ala 50 mm, espesor 6 mm	880
Anillo	1 de diámetros 60,3 y 15mm, espesor 6 mm	167
Tubo de 200 mm	1 tubo de diámetro exterior 33,4 mm, espesor 3 mm	235
Trapezio	1 de longitud 100 mm, anchura de 20 a 56, espesor 10 mm	296
PESO TOTAL MONTURA		4.910
COLA DEL AEROGENERADOR		
ACERO		
Tubo de 150 mm	1 de diámetro exterior 42,2 mm, espesor 3 mm	206
Tubo de 1200 mm	1 de diámetro exterior 42,2 mm, espesor 3 mm	1883
Barra	1 de 300x30x8 mm	562
Tuercas M10	3	28
Tornillos M10	3 de M10 x 60	123
MADERA		
Madera contrachapada	1 de bases 900,600mm, altura 600mm, espesor 10mm	1890
PESO DE LA COLA		4.692
Material para soldadura	1123 mm de varilla de Diámetro 3 mm	65
PESO TOTAL AEROGENERADOR		36.386

Tabla 4.2. Peso de los elementos del aerogenerador.



5. ESTUDIO ELÉCTRICO DEL AEROGENERADOR

5.1. Introducción

La potencia de entrada que obtiene un aerogenerador se consigue convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las palas del rotor. La cantidad máxima de energía que el viento puede transferir al rotor, depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento. Para que se produzca una absorción de energía por parte del rotor, éste debe provocar una reducción de la velocidad del viento, convirtiendo la energía del viento en energía rotacional.

Debido a que el caudal que pasa por el rotor se debe mantener constante, se provoca un ensanchamiento de la sección transversal detrás del plano del rotor. En la siguiente figura se muestra dicho efecto, donde se muestra el tubo de corriente alrededor del rotor eólico. Se puede observar que debido a la reducción de la velocidad del viento, se debe producir un aumento de la sección de paso para mantener la cantidad de aire en circulación. La reducción de velocidad se produce de forma gradual, hasta que se llega a un valor constante.

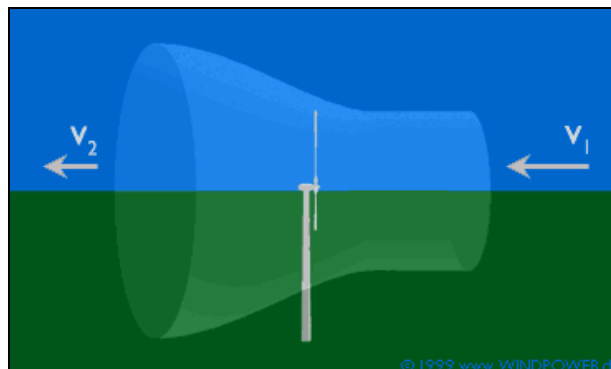


Fig. 5.1. Velocidades de entrada y salida. [10]

Finalmente, la potencia que contiene el viento $P_{eólica}$ (W) que pasa por una sección circular determinada es la siguiente:

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot (D/2)^2 \quad (\text{Ec.5.1})$$

D: diámetro del rotor eólico (m)

v: velocidad del viento que incide sobre el rotor (m/s)

ρ : densidad del aire (kg/m^3)



Como es de suponer, el rotor eólico no puede convertir toda esa energía eólica en energía de rotación, ya que si así fuera, la velocidad del viento en la salida del rotor, sería nula, impidiendo la entrada de más aire. Así pues, hay un factor de aprovechamiento máximo de la energía eólica del viento, que está definido por la Ley de Betz, ésta demuestra que en el caso de un aerogenerador ideal, la velocidad del viento de salida sería como mínimo 1/3 de su velocidad inicial.

Así pues, se define el coeficiente de potencia (C_p) como la relación entre la energía que contiene el viento que pasa a través de la sección barrida por el rotor eólico y la energía de rotación que finalmente se consigue. Tal y como se ha efectuado en el apartado del estudio eléctrico que se muestra a continuación, se calcula el coeficiente de potencia como el cociente de la potencia eléctrica obtenida por el generador entre la potencia eólica, teniendo en cuenta el rendimiento del sistema de generación.

$$C_p(v) = \frac{8 \cdot P(v)}{\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \eta_g \cdot v^3} \quad [11] \quad (\text{Ec.5.2})$$

$C_p(v)$: coeficiente de potencia en función del viento

$P(v)$: potencia eléctrica en función del viento (W)

Así pues, conocido el coeficiente de potencia, se puede conocer la potencia que el rotor eólico aprovecha del viento, calculándose ésta de la siguiente forma:

$$P_{eje}(v) = \frac{1}{2} C_p(v) \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v^3 \quad (\text{Ec.5.3})$$

Para determinar el comportamiento del aerogenerador en función del viento, y poder hacer una caracterización completa de éste, se ha utilizado el estudio realizado, al mismo tipo de aerogenerador, por Teodoro Sánchez C. y José E. Chiroque B. de ITDG-CONCYTEC-UNI, "Evaluación y mejoras del aerogenerador ITDG modelo IT-PE-100" facilitado por E.S.F.

5.2. Resumen del estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI

El trabajo de investigación realizado por Teodoro Sánchez C. y José E. Chiroque B. se centra en la mejora de las características técnicas del sistema, especialmente de su rendimiento. Así pues, la parte principal del estudio se centra en la comparativa entre un generador de imanes permanentes de ferrita y otro con imanes de neodimio, ambos de idéntico diseño. El trabajo se puede separar en cuatro partes distintas, a continuación se explicarán las partes cuyos resultados utilizaremos posteriormente.



5.2.1. Pruebas con el motor Shunt

Antes de poder probar el generador en viento real y calcular los parámetros necesarios, se necesita hacer un estudio previo del generador, con un sistema totalmente conocido para definir así el generador. Para tener esto, en lugar del viento como fuerza motriz se utilizó un motor eléctrico de corriente continua tipo Shunt para dar el movimiento de rotación al generador de forma totalmente controlada.

Previamente se le realizó un análisis del motor Shunt, para calcular los parámetros necesarios de éste, como pueden ser las pérdidas eléctricas internas ($P_{eléc}$) o las pérdidas rotacionales, de ventilación y diversas (P_{perd}).

Para determinar la potencia útil que se dispone en el eje del motor para cualquier potencia eléctrica de entrada, se deben calcular las pérdidas que se producen en éste. Las pérdidas eléctricas debidas a la resistencia interna del generador, se pueden medir directamente. Para conocer las pérdidas del motor se realizó una prueba al motor en vacío a distintas velocidades.

5.2.2. Estudio del generador con imanes permanentes de Neodimio

Una vez ya se tiene los parámetros necesarios del motor Shunt, se acopla éste al generador, y a partir de una potencia eléctrica de alimentación, se da movimiento al generador, tomando los valores de tensión en bornes de las bobinas, y también de los rectificadores. Las pruebas que se realizaron al generador y sus resultados son las siguientes.

Primero se realizó una prueba en vacío para conocer las pérdidas del generador y su circuito interno. La expresión que define las pérdidas rotacionales del generador de imanes de neodimio ($P_{perd,g}$ [w]) en función de la velocidad de giro (n [rpm]):

$$P_{perd,g} = 7 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 0,0958n \quad [11] \quad (Ec.5.4)$$

La tensión de línea en bornes del generador (V_{ac} [V]) en función de la velocidad de giro (n [rpm]):

$$V_{ac} = 0,0585 \cdot n \quad [11] \quad (Ec.5.5)$$



Como la conexión es en estrella, la tensión de fase V_{fase} (V) será $V_{\text{ac}} / \sqrt{3}$ quedando:

$$V_{\text{fase}} = 0,034 n \quad [11] \quad (\text{Ec.5.6})$$

Siendo finalmente la constante real de la máquina de imanes permanentes de Neodimio: **K = 0,034 V/rpm**

Para conocer las características de trabajo del generador en estudio, se hizo una evaluación de éste conectado a una carga similar a la que es requerida para el uso, en este caso, las pruebas se realizaron con una batería de automóvil de 12 voltios y 13 placas. Con esto, se obtuvo una tabla con valores de tensión e intensidad en corriente alterna en bornes del generador y en continua en bornes de la batería.

La curva de potencia en bornes del generador P_{ac} [W] en función de la velocidad de giro [rpm] queda representada en el siguiente gráfico, donde también se muestra la evolución de la potencia en continua P_{dc} (W), así como el rendimiento eléctrico, la intensidad en continua I_{dc} (A) y la tensión en continua V_{dc} (V).

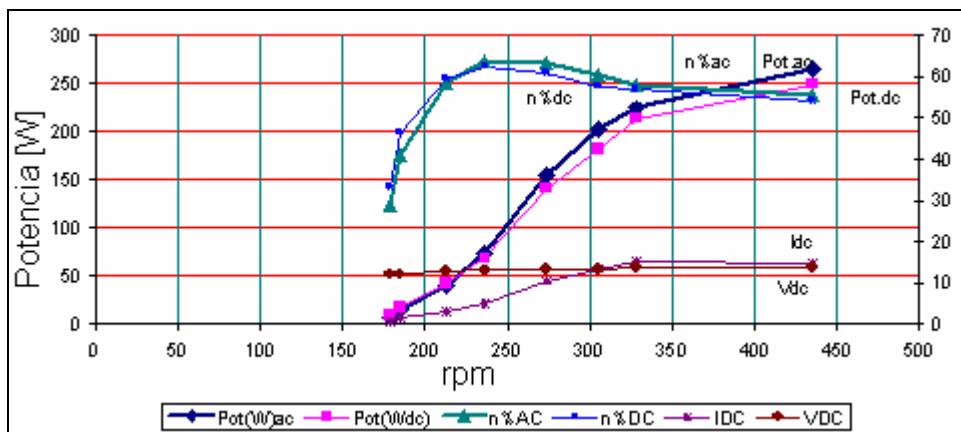


Gráfico 5.1. Potencia y rendimiento en C.C. y en C.A. para el PMG de Neodimio. [11]

Se puede observar que el valor mayor de rendimiento que se consigue es de 62,5% para una velocidad de rotación de aproximadamente 250 rpm. Estos cálculos se efectuaron sin tener en cuenta las pérdidas por efecto Joule en los rectificadores.

5.2.3. Estudio del aerogenerador de imanes permanentes de neodimio

Una vez se tubo el generador totalmente definido, se prosiguió el estudio con el acople del rotor de tres palas de perfil NACA 4412. El montaje fue instalado junto un banco de pruebas al aire libre, para conseguir así un análisis en condiciones reales. Se tomaron valores de velocidad del viento, intensidad y voltaje en bornes de la batería cada cierto tiempo.



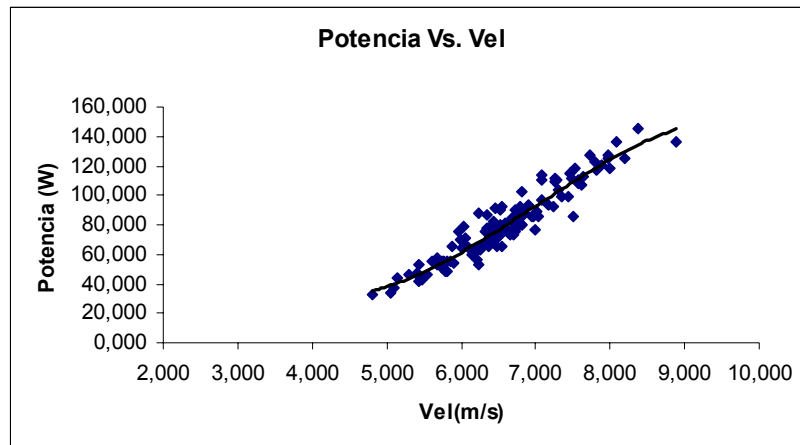


Gráfico 5.2. Potencia en la batería en función de la velocidad del viento para PMG de NdFeB. [11], elaboración propia.

El factor más importante de este estudio es la eficiencia o rendimiento global del sistema, ya que indica la capacidad de transformar la energía mecánica en eléctrica del aerogenerador.

La eficiencia (n_s) se calculó con la siguiente ecuación:

$$C_p(v) \cdot \eta_g = \frac{8 \cdot P(v)}{\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot v^3} = n_s \quad (\text{Ec.5.7})$$

Los valores obtenidos, se muestran en el gráfico 5.4.

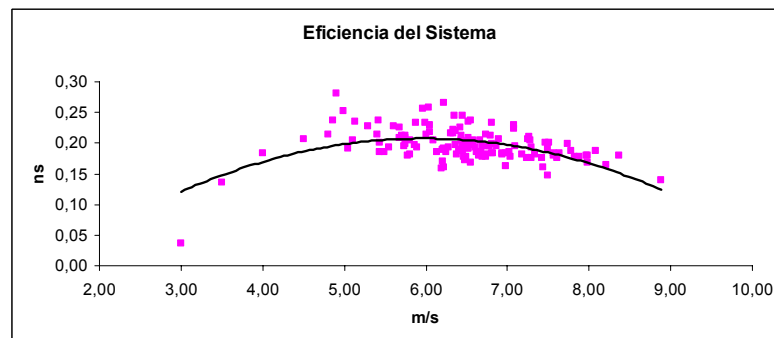


Gráfico 5.3. Comparativa de eficiencia entre los dos aerogeneradores. [11], elaboración propia.

El rango de eficiencia máxima se tiene para una velocidad del viento comprendida entre 5 y 6 m/s, en el generador de imanes de Neodimio (NdFeB).

A continuación se va a realizar un estudio teórico del valor de la tensión del generador de imanes permanentes de Neodimio que permita contrastar el resultado obtenido en el estudio anterior.



5.3. Cálculo teórico de la tensión en el generador de Neodimio

El objetivo de este apartado es determinar las expresiones que permitan caracterizar la potencia eléctrica de salida, así como la potencia eólica de entrada del aerogenerador, para poder así conocer la eficiencia del sistema, y todos los parámetros que determinan estas potencias para ser capaces en posteriores estudios de este proyecto de poder optimizar el sistema que compone el aerogenerador.

La tensión generada en el interior del generador será de forma aproximada alterna sinusoidal, debido a que la variación del flujo magnético, que es la causa de que si produzca una fuerza electromotriz inducida, puede aproximarse a sinusoidal.

Para determinar la tensión de salida del generador en función de la velocidad de rotación del aparato (rpm), se analiza aquí el proceso lógico de la generación de la tensión.

En primer lugar se tiene en cuenta la tensión inducida en una bobina, con sus características en el tiempo, posteriormente se tiene en cuenta la relación entre las tensiones temporales de las seis bobinas.

El aerogenerador está ideado para ser conectado a una batería, lo que requiere de un sistema rectificador, mediante un puente de diodos, a la salida del generador.

A continuación, paso a paso, se va a determinar la expresión de la tensión teórica de salida en continua del generador en función de su velocidad de rotación.

En primer lugar se va a calcular la tensión alterna inducida en una espira y por tanto en una bobina.

5.3.1. Cálculo teórico de la tensión eficaz inducida en una bobina

Para calcular la tensión o fuerza electromotriz inducida (e) en una bobina habrá que calcular primeramente cómo varía el flujo en el tiempo, ya que la tensión inducida se calcula con la siguiente expresión:

$$e = \frac{-d\phi}{dt} \quad (\text{Ec.5.8})$$

e = fuerza electromotriz inducida (V)

ϕ = flujo magnético (Wb)



Donde el flujo en este caso se obtiene como:

$$\phi = B(t) \cdot S \cdot N \quad (\text{Ec.5.9})$$

$B(t)$ = inducción o campo magnético en función del tiempo (T)

S = superficie de una espira de la bobina atravesada por el campo magnético (m^2)

N = número de espiras que constituyen una bobina (número de vueltas)

El flujo magnético en este tipo de aerogenerador es un flujo axial (es decir perpendicular al radio de giro del aerogenerador), de manera que los dos rotores de imanes permanentes generan un campo magnético entre cada uno de sus pares de polos de manera alterna, como se deriva de la disposición de los imanes.

Hay que recordar que existe un diámetro imaginario centrado en el generador sobre el cual están posicionados tanto los centros de los imanes como los centros de las bobinas.

Por tanto, si se toma como referencia una bobina cualquiera, el flujo que ve pasar a través de ella, en una vuelta entera del generador, tendrá $p/2$ valores máximos de flujo (por ejemplo cuando pasa por delante de la bobina un par de polos con el Norte en el rotor frontal y el sur en el rotor trasero) y $p/2$ valores mínimos de flujo (cuando pasa por delante de la bobina un par de polos con el sur en el rotor frontal y el norte en el rotor trasero).

Donde p es el número de pares de polos (equivale al número de imanes de cada rotor). Todo esto se ve más claro si observando la Fig. 5.2. (la bobina está quieta y el rotor gira), se evalúan los valores de $B(t)$ ciertos ángulos determinados de giro del rotor con 8 pares de polos.

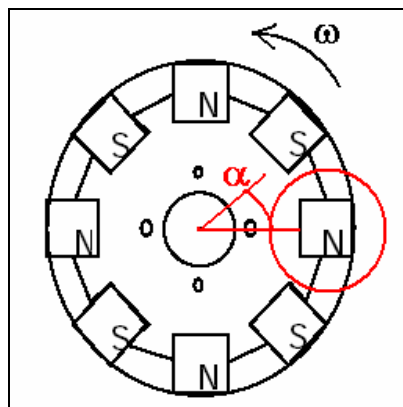


Fig. 5.2. Posicionamiento de una bobina respecto los imanes del rotor.



Se evalúan los ángulos donde el campo magnético se sabe que será máximo en valor absoluto, para un rotor de 8 pares de polos:

$Si \alpha = 0^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 45^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 90^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 135^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 180^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 225^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 270^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 315^\circ \rightarrow B(t) = -B$

Tabla 5.1. Valor instantáneo de B(t) según el ángulo girado por el rotor respecto a una bobina.

Si se deben tener 4 máximos la expresión sinusoidal tiene cuatro máximos y cuatro mínimos, con lo que se deduce que el número de máximos es la mitad que el número de pares de polos.

Se observa, por tanto que imponiendo estos valores, para una bobina tomada como referencia, la expresión del campo magnético en función del tiempo que cumple estos valores es la siguiente:

$$B(t) = B \cdot \cos\left(\frac{p}{2} \cdot \alpha\right) \quad (\text{Ec.5.10})$$

$$\alpha = \omega \cdot t \quad (\text{Ec.5.11})$$

B = campo magnético uniforme creado entre dos bloques magnéticos enfrentados (T)

α = ángulo girado por el generador (rad)

ω = velocidad angular de giro del generador (rad/s)

t = tiempo transcurrido para girar un ángulo α (s)

Por tanto, de las ecuaciones (Ec.5.9) y (Ec.5.10) se obtiene que el flujo que atraviesa a una bobina será igual a $B \cdot S \cdot N \cdot \cos(p/2 \cdot (\alpha))$, que sustituyendo la ecuación (Ec.5.11) queda así:

$$\phi = B \cdot S \cdot N \cdot \cos\left(\frac{p}{2} \cdot (\omega \cdot t)\right) \quad (\text{Ec.5.12})$$



Ahora que ya se conoce el flujo que atraviesa una bobina, se puede calcular el valor de la fuerza electromotriz inducida en una bobina, utilizando de la Ec. 5.8. Así se obtiene que la expresión temporal de la tensión inducida en una bobina se calcula:

$$e = B \cdot S \cdot N \cdot \frac{p \cdot \omega}{2} \left(-\text{sen} \left(\frac{p}{2} \cdot (\omega t) \right) \right) \quad (\text{Ec.5.13})$$

Al tratarse de una tensión senoidal, la constante que multiplica al seno, es el valor máximo de la tensión, con lo cual el valor eficaz de la tensión inducida en una bobina será el máximo dividido por raíz de dos:

$$E_{\text{ef}} = B \cdot S \cdot N \cdot \frac{p \cdot \omega}{2\sqrt{2}} \quad (\text{Ec.5.14})$$

Bien es cierto que esta es la expresión que se buscaba, pero mientras N, p y ω son números que teóricamente son datos directos, hay que calcular el campo magnético uniforme que se crea en el espacio entre un par de polos enfrentados con polaridad opuesta, y también hay que calcular la superficie S de una espira de una bobina que es atravesada por el campo magnético uniforme B.

Cálculo de la superficie S

La superficie a tener en cuenta es inferior a la superficie media de la bobina ya que el flujo de campo magnético abarca una superficie inferior a las dimensiones de las bobinas (ver Fig. 5.4). De manera que se puede suponer que las líneas de inducción magnética abarcan una superficie cuadrada casi idéntica a la superficie de los bloques magnéticos, pero algo superior ya que la disposición de las líneas de campo magnético son un poco abombadas debido a la distancia existente entre los imanes (ver Fig. 5.3). [11]

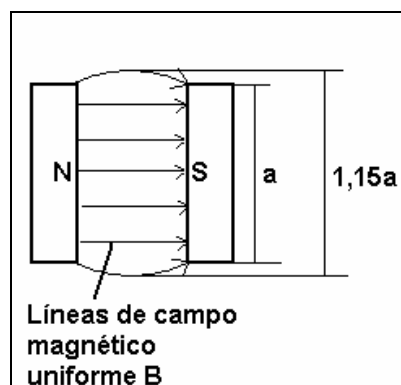


Fig. 5.3. Líneas de campo magnético y su ocupación entre los imanes.



Observando la Fig. 5.3 se observa que un cálculo aproximado de la superficie (cuando la superficie de los imanes sea inferior a la superficie media abarcada por una espira) será:

$$S = (1,15 \cdot a)^2 \quad (\text{Ec. 5.15})$$

a: dimensión del bloque magnético (m)

S (m²)

Cálculo del campo magnético uniforme B

Para calcular el campo magnético uniforme B, que se crea al colocar dos imanes idénticos, enfrentados con polaridad opuesta, hay que conocer varios parámetros característicos de los imanes, de su colocación, y del material que se interpone entre ellos hay que hacer algunas hipótesis.

Los parámetros de los que depende el campo magnético B creado entre los imanes, son principalmente la distancia entre imanes (17 mm en nuestro caso), la dimensión de un polo del imán (50x50mm), la inducción remanente Br (T) característica del tipo de imán (para los imanes de Neodimio demandados en este proyecto es de 1,11 T) y finalmente es determinante el tipo de material que se encuentra entre los imanes y las propiedades magnéticas de éste.

Por este último parámetro es muy complicado calcular teóricamente un resultado satisfactorio ya que entre los imanes hay una zona de 1mm de aire a cada lado del estator y el propio estator con las bobinas incrustadas en resina recubierta con una capa de fibra de vidrio. Es por eso que la mejor manera de determinar el campo magnético uniforme creado al enfrentar dos imanes iguales con polaridad opuesta, en la situación descrita (estator en medio de los imanes) es medir el campo magnético en condiciones reales, tal como se hizo en un estudio realizado por ITDG con el apoyo de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) sobre un aerogenerador de las mismas características que el de este proyecto. [11]

En dicho estudio, para medir el campo magnético, se hace girar a una velocidad conocida el rotor y se mide la tensión en bornes de una bobina. Conociendo la tensión, la velocidad angular, el número de espiras de la bobina, la superficie S y el número de pares de polos, se puede obtener el valor del campo magnético B (T). Se puede suponer que se establece una relación proporcional entre los valores Br y B para un mismo tipo de aerogenerador, dependiendo Br del tipo de imán utilizado.



De este modo, en el estudio de ITDG y la UNI se determinó que el campo magnético uniforme B para imanes de Ferrita es de 0,2 T y para imanes de Neodimio de 0,585 T. Con lo que se demuestra que hay una relación proporcional entre B y B_r , que se mantiene constante como se ha deducido en la siguiente tabla:

Tipo de Imán	Inducción remanente B_r (T)	Inducción creada en el estator B (T)	Relación B_r/B
Ferrita	0,38	0,2	1,900
Neodimio (NdFeB)	1,11	0,585	1,897

Tabla 5.2. Relación entre la inducción remanente y la inducción exterior.

Por tanto, teniendo en cuenta la similitud entre el aerogenerador estudiado por ITDG (referencia) y el que es objeto de este proyecto, el campo magnético uniforme B (T), creado en el plano intermedio de los dos rotores (plano del estator), para el generador de imanes permanentes descrito en este documento puede tomarse como $B = \frac{B_r}{1,9}$.

5.3.2. Cálculo teórico de la tensión de salida del generador

Para calcular la tensión alterna de salida que aportan todas las bobinas que forman el estator del generador, es necesario conocer el número de bobinas, y su colocación en el estator. En nuestro caso se tienen 6 bobinas, dispuestas de forma equidistante (el ángulo entre los centros de las bobinas adyacentes es de 60°), de manera que en un momento determinado se tiene la siguiente disposición de imanes y bobinas superpuestas sobre los imanes:

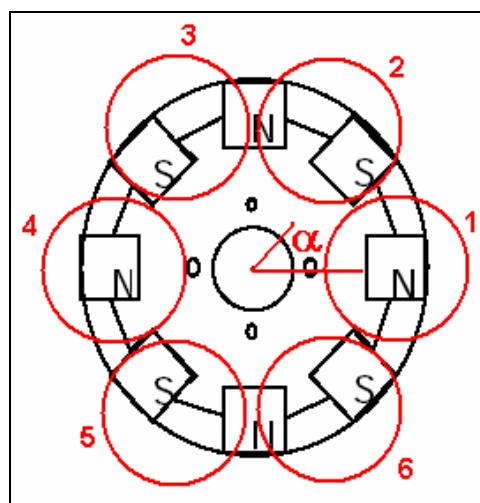


Fig. 5.4. Posicionamiento de las bobinas respecto de los imanes.



Observando esta disposición se puede apreciar que las bobinas están en fase dos a dos, es decir, que las bobinas 1 y 4 se ven afectadas por las mismas variaciones de campo magnético, y de igual modo les sucede a las bobinas 2 y 5 y a las bobinas 3 y 6.

De la misma forma que se ha deducido la expresión (Ec.5.10) para una bobina que consideraremos que es la bobina 1, se pueden deducir las expresiones del campo magnético en función del tiempo para todas las bobinas:

De modo que el campo magnético que ven pasar las bobinas 1 y 4 es el mismo:

$$B(t)_{1,4} = B \cdot \cos\left(\frac{p}{2} \cdot (\omega t)\right) \tag{Ec.5.16}$$

Para ver cual es el campo que afecta a las bobinas 2 y 5 se repite el procedimiento realizado para encontrar la ecuación (Ec.5.6). Se evalúan los ángulos donde el campo magnético se sabe que será máximo en valor absoluto, para un rotor de 8 pares de polos:

$Si \alpha = 30^\circ (\pi / 6) \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 75^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 120^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 165^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 210^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 255^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 300^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 345^\circ \rightarrow B(t) = -B$

Tabla 5.3. Valor de B(t) según el ángulo girado por el rotor respecto a las bobinas 2 y 5.

Por tanto se deduce que el campo magnético que ven pasar las bobinas 2 y 5 es $B \cdot \cos(4 \cdot (\omega t - \pi/6))$, con lo cual:

$$B(t)_{2,5} = B \cdot \cos\left(4 \cdot \omega t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \tag{Ec.5.17}$$

Se repite el procedimiento para evaluar es el campo que afecta a las bobinas 3 y 6, y por tanto se evalúan los ángulos donde el campo magnético se sabe que será máximo en valor absoluto, para un rotor de 8 pares de polos:



$Si \alpha = 15^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 60^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 105^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 150^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 195^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 240^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$Si \alpha = 285^\circ \rightarrow B(t) = B$
$Si \alpha = 330^\circ \rightarrow B(t) = -B$

Tabla 5.4. Valor de B(t) según el ángulo girado por el rotor respecto a las bobinas 3 y 6.

Por tanto se deduce que el campo magnético que ven pasar las bobinas 3 y 6 es $B \cdot \cos(4 \cdot (\omega \cdot t + \pi/6))$, con lo cual:

$$B(t)_{3,6} = B \cdot \cos(4 \cdot \omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \quad (\text{Ec.5.18})$$

Repetiendo el proceso realizado con la expresión (Ec.5.10) hasta llegar a la ecuación (Ec.5.13) y teniendo en cuenta que se tienen 8 pares de polos, se tiene que las ecuaciones de las tensiones inducidas en las 6 bobinas son las siguientes:

$$e_{1,4} = B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega \cdot \text{sen}(4 \cdot \omega \cdot t) \quad (\text{Ec.5.19})$$

$$e_{2,5} = B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega \cdot \text{sen}(4 \cdot \omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \quad (\text{Ec.5.20})$$

$$e_{3,6} = B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega \cdot \text{sen}(4 \cdot \omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \quad (\text{Ec.5.21})$$

De estas expresiones se observa que la tensión eficaz en todas las bobinas será:

$$U = \frac{B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ec.5.22})$$

Además, ω se puede expresar como:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (\text{Ec.5.23})$$

ω : velocidad angular del aerogenerador (rad/s)

n: velocidad angular del aerogenerador (rpm)

Por tanto, la ecuación de la tensión en una bobina:

$$U = \frac{B \cdot S \cdot N \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{15 \cdot \sqrt{2}} \quad (\text{Ec.5.24})$$



Substituyendo los valores del caso concreto del aerogenerador que se estudia:

$$B = \frac{B_r}{1,9}, \text{ con imanes de Neodimio } \rightarrow B_r = 1,11 \text{ T} \rightarrow B = 0,585 \text{ T}$$

$$S = (1,15 \cdot a)^2, \text{ con } a = 0,05 \text{ m} \rightarrow S = 3,3E-3 \text{ m}^2$$

$$N = 100 \text{ espiras}$$

Se obtiene el valor teórico de la tensión en cada bobina, en función de las rpm:

$$U = 0,05718 \cdot n \quad (\text{Ec.5.25})$$

Al estar desfasadas las parejas de bobinas 120° entre ellas, si se conectan o bien en serie o bien en paralelo las bobinas 1 con la 4, la 2 con la 5 y la 3 con la 6, se obtiene un sistema de generación eléctrica trifásico.

Al conectar en serie las bobinas se puede considerar que la bobina 1 con la 4 forman una sola bobina equivalente con el doble de resistencia, inductancia y tensión. Lo mismo sucede con las otras parejas de bobinas al conectarse en serie la 2 con la 5 o la 3 con la 6.

Finalmente, para conocer cuál será la tensión alterna de línea de salida habrá que estudiar tres casos de interconexión de las bobinas; un primer caso de conexión en estrella con las parejas de bobinas conectadas en serie, una segunda posible conexión en triángulo con las parejas de bobinas conectadas en serie, y el tercer caso que será el que se explica en la conexión definitiva de las bobinas del generador de este proyecto, en el que se realiza la conexión Doble-Estrella que consiste en conectar las bobinas en fase en paralelo y las 3 parejas en estrella.

Conexión en estrella

La conexión en estrella de las bobinas sigue el esquema de la Fig.5.5, de manera que la tensión de línea será la tensión en una rama multiplicada por raíz de 3 con lo cual si recordamos la ecuación 15, se deduce que:

$$U_{1,Y} = \sqrt{\frac{3}{2}} B \cdot S \cdot N \cdot \omega \quad (\text{Ec.5.26})$$



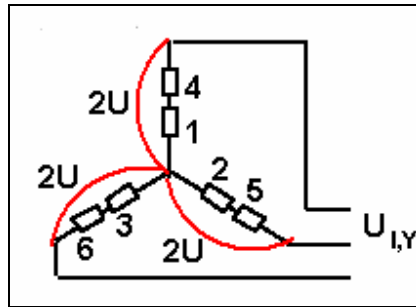


Fig. 5.5. Esquema de la conexión en estrella simple de las bobinas.

Conexión en triángulo

En la Fig.5.6 se observa la conexión de las 6 bobinas, conectadas en serie las bobinas en fase, y en triángulo las parejas de bobinas desfasadas 120° . De manera que la tensión de línea que se obtiene con esta conexión es directamente la tensión de una rama con dos bobinas en fase conectadas en serie:

$$U_{1,\Delta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot B \cdot S \cdot N \cdot 8 \cdot \omega \quad (\text{Ec.5.27})$$

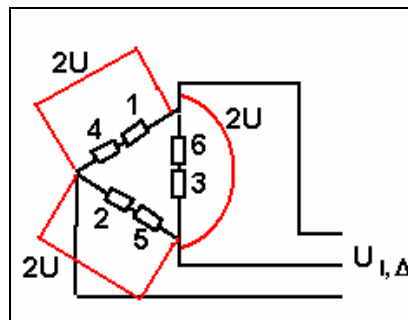


Fig.5.6. Esquema de la conexión en triángulo de las bobinas.

Conexión en Doble-Estrella

La conexión doble-estrella es la elegida para el aerogenerador de este proyecto.

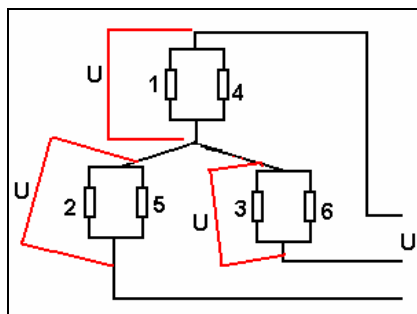


Fig.5.7. Esquema de la conexión en doble estrella de las bobinas.



Como se observa en la Fig.5.7, las bobinas en fase están conectadas en paralelo de manera que cada rama tiene una tensión U, y al ser conectadas las 3 ramas en estrella, la tensión de línea será U por raíz de 3.

$$U_{l,2Y} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega \tag{Ec.5.28}$$

Tal y como se explica en la documentación facilitada por ITDG, ésta es la conexión que se describe en el manual del Anexo F.

5.3.3. Cálculo de la tensión de salida del rectificador

Como se describe en el apartado 1 de anexo F (manual de construcción del PMG), la corriente alterna trifásica de salida del generador se convierte en corriente continua utilizando dos rectificadores monofásicos de puente, que tal y como están conectados equivalen ambos juntos a un rectificador trifásico no controlado, como se puede ver en el circuito equivalente de la Fig.5.8.

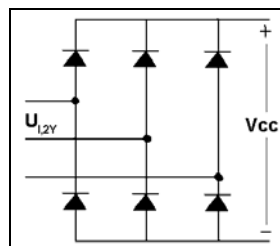


Fig.5.8. Esquema equivalente de conexión de los 2 rectificadores monofásicos.

Por tanto, sabiendo que el circuito equivalente de la conexión de las bobinas a los dos rectificadores, equivale a conectar las bobinas (ya sea en estrella o en triángulo) a un rectificador trifásico no controlado, se puede afirmar que la tensión continua de salida del rectificador trifásico (V_{CC}), sigue la siguiente expresión:

$$V_{CC} = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{U_1}{\pi} \tag{Ec.5.29}$$

Así pues, si la conexión de las bobinas en Doble-Estrella se obtiene que la tensión en bornes del rectificador será:

$$V_{CC} = \frac{12 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot B \cdot S \cdot N \cdot \omega \tag{Ec.5.30}$$

Si recordamos la expresión 16, se obtiene que la tensión de salida del rectificador es:

$$V_{CC} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{5} \cdot B \cdot S \cdot N \cdot n \tag{Ec.5.31}$$



Substituyendo las constantes de la (Ec.5.24) se obtiene:

Tensión continua teórica (V) del aerogenerador en función de la velocidad de giro n (rpm)

$$V_{CC} = 0,1337 \cdot n \quad (\text{Ec.5.32})$$

Comparando el valor obtenido teóricamente con el valor obtenido en el estudio de ITDG-COCYTEC-UNI [11] de la tensión en cada fase del generador se observa que según el estudio teórico, la tensión de fase es proporcional a la velocidad de giro (rpm) con una constante de proporcionalidad de 0,057 V/rpm, mientras que según el estudio real de ITDG-CONCYTEC-UNI [11] está constante de proporcionalidad es 0,034 V/rpm [11]. Esto puede ser debido a que el valor del campo magnético uniforme entre imanes es menor en la práctica a causa de las imperfecciones en la manufactura del PMG.

Para la caracterización del aerogenerador se va a utilizar la constante obtenida de forma experimental según ITDG-CONCYTEC-UNI [11].

5.4. Caracterización del Aerogenerador

En este apartado se pretende establecer una relación entre la velocidad del viento que incide sobre el rotor y la potencia eléctrica en bornes de la batería. Mediante una hoja de Excel se pretende hacer el seguimiento. Consiguiendo así una plantilla que efectúe los cálculos rápidamente ante la modificación de parámetros y permitir estudiar como varía el resultado con la variación de éstos. La relación entre los distintos parámetros utilizados en el Excel se han deducido de los resultados obtenidos en el estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI [11].

A continuación se detalla como se han calculado las relaciones entre los parametros para poder calcular las variables a estudiar.

5.4.1. Relación del coeficiente de potencia y el parámetro lambda

La relación entre el coeficiente de potencia y el parámetro lambda, indica el aprovechamiento eólico del aerogenerador para una velocidad del viento. Para llegar a esta relación, se han utilizado los resultados obtenidos en el estudio de ITDG mencionados en el apartado anterior. Se han seguido los siguientes pasos:

Cálculo de la potencia en continua [W] en función del viento, con los valores medidos del aerogenerador y en funcionamiento real.



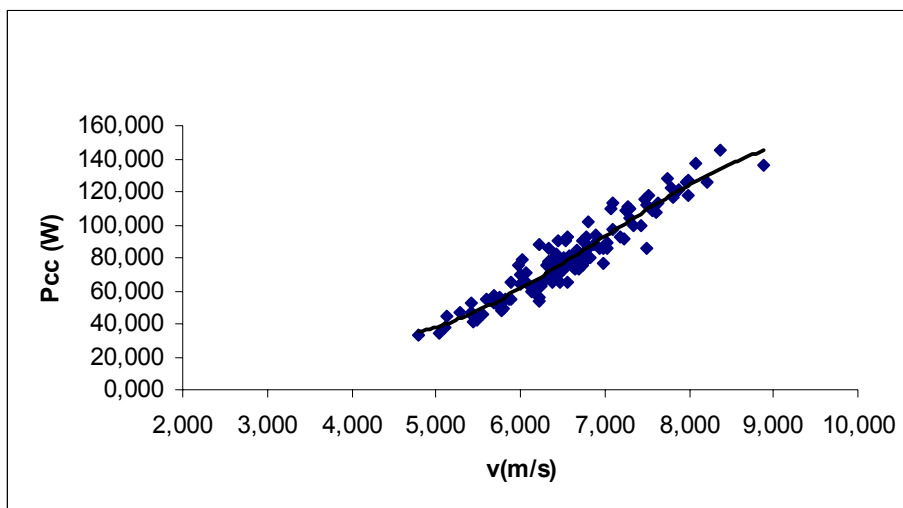


Gráfico 5.4. Relación entre Potencia eléctrica en continua $P_{cc}[W]$ y velocidad del viento $v[m/s]$.

$$P_{CC} = -1,3992 \cdot v^3 + 29,263 \cdot v^2 - 171,19 \cdot v + 337,2 \tag{Ec.5.33}$$

De los datos tomados en las pruebas del generador acoplado al motor shunt, se establece la relación entre la velocidad de giro y la potencia eléctrica en los bornes de la batería. Cálculo de las rpm del aerogenerador en función de la potencia eléctrica en continua.

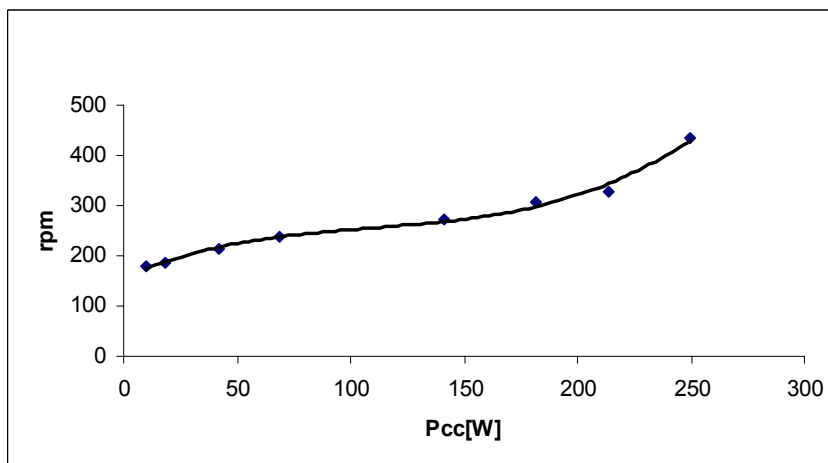


Gráfico 5.5. Relación entre velocidad de rotación [rpm] y potencia en continua $P_{cc}[W]$.

$$rpm = 5 \cdot 10^{-5} \cdot P_{CC}^3 - 0,0152 \cdot P_{CC}^2 + 2,029 \cdot P_{CC} + 155,5 \tag{Ec.5.34}$$

Con las dos expresiones obtenidas, se pueden calcular los valores de velocidad de rotación en función del viento. Así pues con la expresión Ec. 5.33 y la relación anterior, se calculará el valor de la lambda (T.S.R.) en función de la velocidad del viento.



$$T.S.R. = \frac{\omega r}{v} \quad (\text{Ec.5.35})$$

Donde:

ω : velocidad de rotación del aerogenerador [rad/s].

r: radio del rotor [0,85 m].

v: velocidad del viento [m/s].

Por otra parte, se calculará el coeficiente de potencia C_p en función del viento, para que juntamente con la relación de la lambda en función del viento, se puedan calcular los dos coeficientes para mismos valores del viento, obteniéndose la relación de C_p en función de lambda.

Para obtener los valores del coeficiente de potencia en función del viento, se han utilizado los valores obtenidos en las pruebas del aerogenerador acoplado al motor shunt (rpm, Pelec ac, Pelec cc, Peje), siguiendo los siguientes pasos.

Con los valores tabulados de velocidad de rotación y potencias en corriente en continua, se calculará la potencia del viento correspondiente con la expresión de potencia eléctrica en continua en función del viento (Ec. 5.33). Se obtienen los valores de velocidad del viento, para cada velocidad de rotación tabulada.

Se calculará la potencia eólica para cada velocidad de rotación. Y finalmente con el cociente de los valores de la potencia mecánica en el eje (Peje) y el potencial eólico, se consigue el valor de la C_p en función de la velocidad de rotación. Obteniendo al siguiente tabla.

RPM	P ac [W]	P cc [W]	Pperd [w]	Peje	v[m/s]	Pvent[W]	Cp
179	7,94	9,68	19,48	27,72	3,4503504	56,8731345	0,4874006
185	14,64	18,15	20,92	35,87	4,03322729	90,8396912	0,39487144
213	40,54	42,24	28,74	66,06	5,25188238	200,568411	0,32936393
236,5	72,97	68,64	41,23	111,94	5,99831708	298,817355	0,3746101
273,4	154,66	141,113	90,22	238,78	6,64285929	405,866044	0,58832219
305,6	202,41	181,57	133,06	315,53	7,3802594	556,586206	0,5669023
328	224,62	214,06	162,64	377,87	8,85762666	962,209573	0,39271071
312	217,38	205,77	167,24	384,44	8,37979765	814,738341	0,47185701
435	264,69	249,25	212,9	467,6	11,8623742	2311,17278	0,20232152

Tabla 5.5. Tabla de valores para el cálculo de C_p en función de lambda.

De la tabla anterior se pueden observar que los valores del coeficiente de potencia son muy altos. Así pues, para poder calcular el coeficiente de potencia en función del parámetro lambda, se utilizará la curva teórica del coeficiente de potencia en función del viento, sacada del estudio de ITDG. Finalmente la relación de la C_p en función del parámetro lambda calculada es:



v [m/s]	Potcc[W]	Rpm	w[rad/s]	lambda	Cp
4,00	31,10	205,40	21,51	4,57	0,1750
4,50	31,92	206,40	21,61	4,08	0,2250
5,00	37,93	213,31	22,34	3,80	0,2688
5,50	48,07	223,46	23,40	3,62	0,3100
6,00	61,30	234,28	24,53	3,48	0,3250
6,50	76,57	244,19	25,57	3,34	0,3438
7,00	92,83	252,87	26,48	3,22	0,3563
7,50	109,03	260,84	27,31	3,10	0,3520
8,00	124,12	268,78	28,15	2,99	0,3448
8,50	137,05	276,79	28,99	2,90	0,3375
9,00	146,78	283,95	29,74	2,81	0,3125
9,50	152,24	288,53	30,21	2,70	0,2760
10,00	152,40	288,67	30,23	2,57	0,2375
10,50	146,20	283,50	29,69	2,40	0,1875

Tabla 5.6. Tabla de valores para el cálculo de Cp en función de lambda, con el valor de Cp teórico.

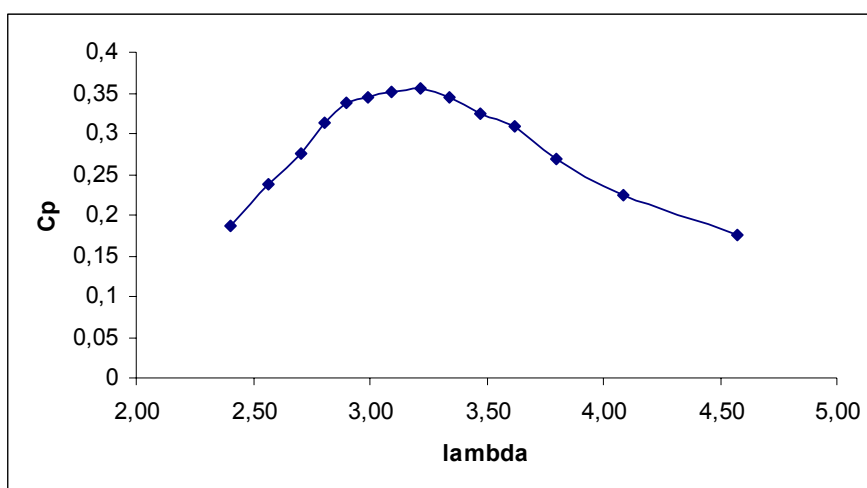


Gráfico 5.6. Coeficiente de potencia en función de lambda.

El rango de valores del viento para el que se considera correcto hacer el cálculo, va entre 4 y 10,5 m/s. Este intervalo queda determinado por los valores que se han utilizado del estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI [11], donde los valores de viento están entre estos valores.

5.4.2. Circuito interno de la batería

En este subapartado se pretende simular el comportamiento del circuito eléctrico desde el generador de imanes permanentes hasta la batería. Teniendo en cuenta la pérdidas eléctricas existentes en el generador y los rectificadores. El circuito eléctrico considerado es el indicado en la Fig.5.9.



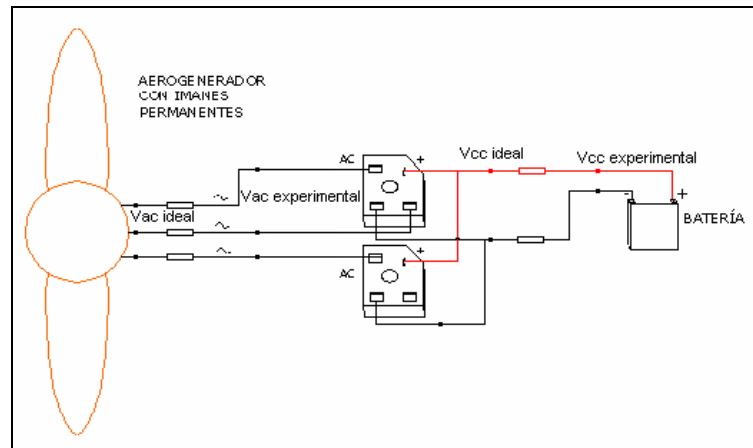


Fig.5.9. Circuito eléctrico equivalente del sistema.

Donde:

➤ Vac ideal

Es la tensión de línea entregada por el generador de imanes permanentes. Su valor se calcula a partir de la constante de línea del generador de imanes permanentes de Neodimio del apartado 5.2 y la velocidad de rotación del rotor.

$$V_{ac\ ideal} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot K \cdot \omega \quad (\text{Ec.5.36})$$

➤ Vac experimental

Es la tensión en alterna de entrada en los rectificadores. Este valor tiene en cuenta las pérdidas eléctricas en las bobinas. Es el valor que se ha medido en el estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI [11] en función de la velocidad de rotación. Para la velocidad de rotación que se tiene el valor de Vac experimental, se calcula el Vac ideal. Finalmente se obtiene la expresión de Vac experimental en función del Vac ideal.

$$V_{ac\ experimental} = -0,0162 \cdot V_{ac\ ideal}^2 + 0,7407 \cdot V_{ac\ ideal} + 4,0878 \quad (\text{Ec.5.37})$$

➤ Vcc ideal

Es la tensión en continua de los rectificadores que se obtendría sin pérdidas; se calcula a partir de la tensión experimental en corriente alterna y multiplicada por la constante proporcional teórica de un rectificador trifásico (el valor se ha calculado de la relación existente entre la tensión en continua y alterna obtenida en las pruebas del generador en vacío).



$$V_{ccideal} = 1,36 \cdot V_{ac\ experimental} \quad (\text{Ec.5.38})$$

➤ $V_{cc\ experimental}$

Es la tensión en continua tomada en bornes de la batería. Es el valor que se ha medido en el estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI [11] en función de la velocidad de rotación. Para la velocidad de rotación que se tiene el valor de $V_{cc\ experimental}$, se tiene también el $V_{cc\ ideal}$. Finalmente se obtiene la expresión de $V_{cc\ experimental}$ en función del $V_{cc\ ideal}$.

$$V_{cc\ experimental} = 0,0299 \cdot V_{ccideal}^3 - 1,4983 \cdot V_{ccideal}^2 + 25,159 \cdot V_{ccideal} - 128,2 \quad (\text{Ec.5.39})$$

Finalmente, se procede al cálculo de las expresiones que nos permitan simular la evolución de las intensidades, tanto en continua como en alterna.

De los valores de tensión e intensidad obtenidos en las pruebas del aerogenerador en funcionamiento real, se calcula la expresión que relaciona la intensidad en función de la tensión en continua, consiguiendo así el comportamiento interno de la batería.

$$I_{cc} = 6,0739 \cdot V_{cc} - 72,68 \quad (\text{Ec.5.40})$$

La intensidad en alterna, se calcula a partir de la relación con la intensidad en continua, que se deduce de los valores experimentales tomados en la prueba del generador acoplado con el motor shunt.

$$I_{ac} = 0,6698 \cdot I_{cc} \quad (\text{Ec.5.41})$$

5.4.3. Explicación de funcionamiento de la hoja Excel

Como ya se ha dicho en el inicio de este apartado, con la hoja Excel se pretende calcular la potencia eléctrica de entrada en la batería en función de la velocidad del viento. El cálculo se lleva a cabo en una macro, que modifica el valor a los parámetros necesarios para conseguir el equilibrio de pares en el eje de generador.

Así pues con los valores de velocidad de entrada, la macro interpola en los valores de C_p en función de λ que se ha calculado anteriormente, dando valores al resto de parámetros, con el fin de cumplir:

$$\text{Par mecánico} + \text{Par magnético} + \text{Par pérdidas} = 0 \quad (\text{Ec.5.42})$$



Donde:

➤ Par mecánico

Es el par encargado de dar el movimiento al generador. Se debe a la potencia eólica que contiene el viento. Se calcula a partir de la potencia que las palas son capaces de aprovechar con el paso del viento. Esto se calcula mediante el coeficiente de potencia C_p .

$$\text{Par mecánico} = \frac{P_{\text{mecánica}}}{\omega} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v^3}{\omega} \quad (\text{Ec.5.43})$$

➤ Par magnético

Es el par que se opone al giro del generador debido al campo magnético inducido. Es proporcional a la intensidad de línea I_{ac} (A) de salida del generador, y la constante de proporcionalidad (Nm/A) se calcula a partir de la constante eléctrica del generador multiplicada por raíz de 3.

$$\text{Par mecánico} = \sqrt{3} \cdot K \cdot I_{ac} \quad (\text{Ec.5.44})$$

➤ Par pérdidas

Es el par que se debe a las pérdidas rotacionales existentes en el generador. Es el resultado obtenido en la prueba del generador en vacío realizada en el estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI [11].

$$\text{Par pérdidas} = \frac{P_{\text{perd},g}}{\omega} = \frac{7 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 0,0958 \cdot n}{\omega} \quad (\text{Ec.5.45})$$

Una vez acabado el archivo Excel, se ha efectuado el cálculo de la potencia eléctrica en continua para distintos valores del viento. Obteniendo así la curva característica del aerogenerador, que se muestra en el gráfico 5.7.



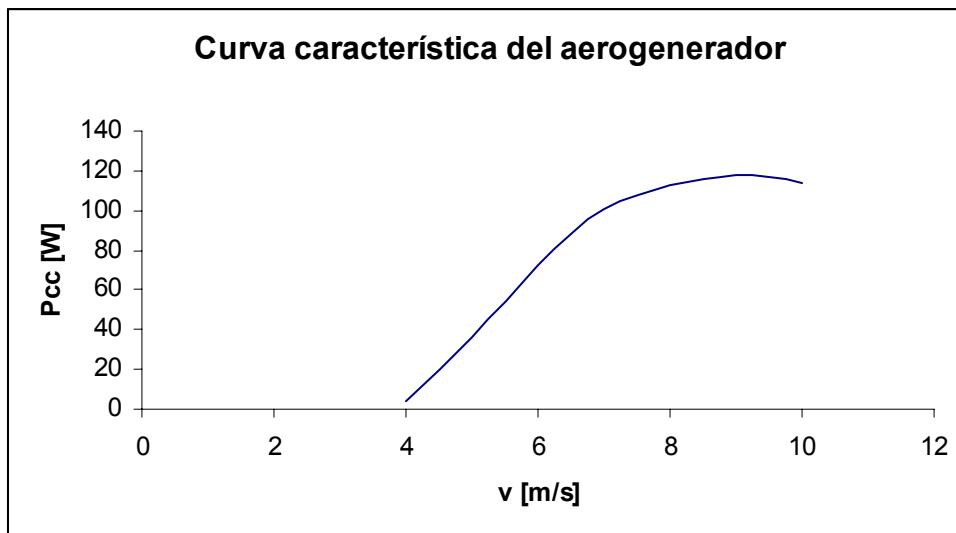


Gráfico 5.7. Curva característica de aerogenerador encontrada con la hoja Excel.

5.4.4. Conclusiones

En la elaboración de la hoja Excel, se debe comentar que se han establecido varias aproximaciones, que pueden afectar a los resultados de comportamiento del sistema obtenidos.

- Un punto muy importante y que debería ser objeto de estudio en proyectos posteriores, es el cálculo de la relación real entre el coeficiente de potencia y del parámetro lambda. Como se ha visto en su momento, los resultados calculados no estaban dentro del rango para el tipo de aerogenerador estudiado. Debido a la imposibilidad de construir nuestro propio aerogenerador para poder calcular este parámetro se ha tomado la solución de utilizar la curva de Cp en función del viento teórica, consiguiendo así una curva Cp en función de lambda dentro del rango de funcionamiento para aerogeneradores de eje horizontal.

- Otro aspecto muy relevante merecedor de un estudio más exhaustivo, es lo que anteriormente se ha denominado como simulación del circuito eléctrico. Donde se deberían calcular de forma mas precisa las pérdidas eléctricas que se producidas en el generador y rectificador, así como el comportamiento real de una batería, ya que la carga a la que se somete el aerogenerador, influye considerablemente, tal y como ya se demostró en el estudio de ITDG-CONCYTEC-UNI [11].



6. ESTUDIO MECÁNICO DEL AEROGENERADOR

La potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento, así pues si la velocidad del viento se dobla, entonces la potencia será ocho veces mayor. Se podría diseñar una máquina mayor preparada para un funcionamiento óptimo para mayores velocidades del viento, pero entonces el 99,9 % del tiempo, el aerogenerador estaría siendo desaprovechado y funcionaría ineficientemente.

Si la velocidad del viento supera un cierto umbral hay un peligro de sobrecarga. El alternador y los diodos se pueden sobrecalentar y la velocidad de giro de las palas puede aumentar peligrando su integridad. Para evitar que todo esto suceda se utiliza un sistema de protección que actúa virando el mecanismo.

El generador está acoplado a la estructura con excentricidad respecto al eje de viraje vertical, de tal forma que el empuje del viento tiende a desviar la máquina de la posición perpendicular a la dirección del viento. Al desviarse un cierto ángulo respecto al viento, la superficie frontal se ve reducida, reduciéndose así la energía que se puede transformar en velocidad de giro, consiguiendo evitar sobre-velocidades. Lo que se intenta es tener el generador en la posición idónea según la fuerza del viento.

En la implantación de este sistema en la práctica, actualmente existen carencias de información técnica detallada acerca del comportamiento óptimo que permita aprovechar el viento al máximo sin que el aparato sufra ningún tipo de problema. Como una introducción a posibles proyectos futuros, en el presente proyecto se pretende realizar una metodología de estudio que comprenda el análisis de las fuerzas que actúan en el conjunto, con los correspondientes momentos de giro provocados, obteniendo como resultado el ángulo de giro de la cola del aerogenerador en función de los parámetros dimensionales del mecanismo y en función de la dirección del viento.

El estudio que se realiza en el presente proyecto se basa en el análisis mecánico sobre el aerogenerador IT-100 realizado por Elisabet Mas de Valls y Lluís Batet Miracle.

6.1. Definición del sistema mecánico

Es fundamental definir las características de la estructura, los ejes de referencia tomados y variables a tener en cuenta para realizar el estudio mecánico.



Además en este subapartado se detallan los valores de los parámetros de diseño correspondientes al aerogenerador descrito en el presente proyecto, tanto en el capítulo 3 como en el Anexo F.



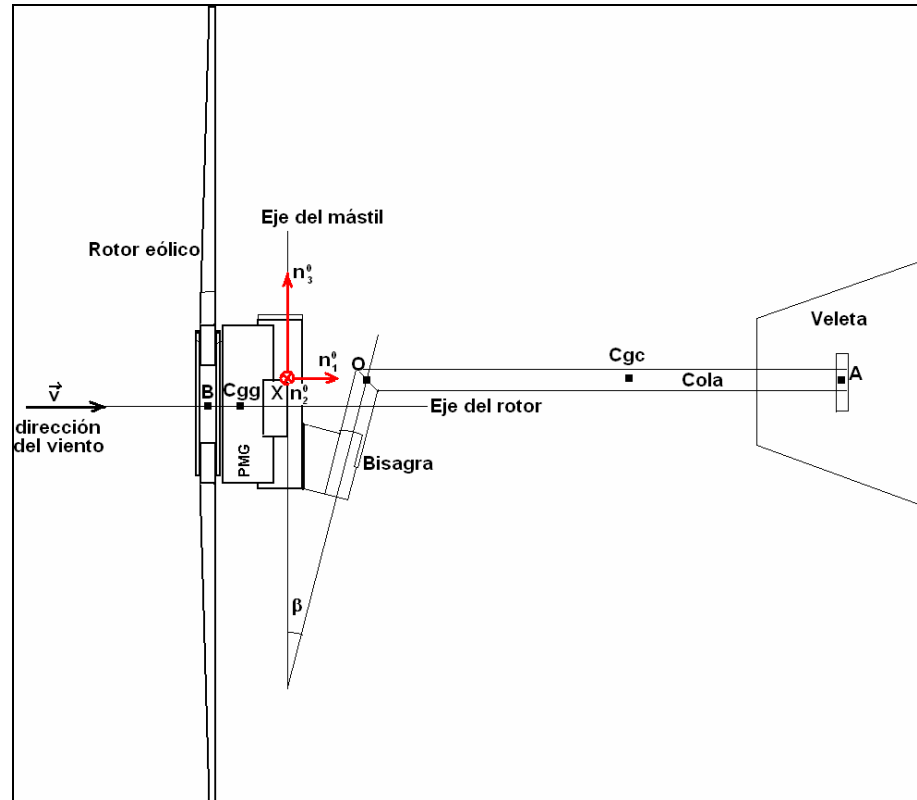


Fig. 6.1. Vista en perfil de la estructura con los parámetros característicos del estudio.

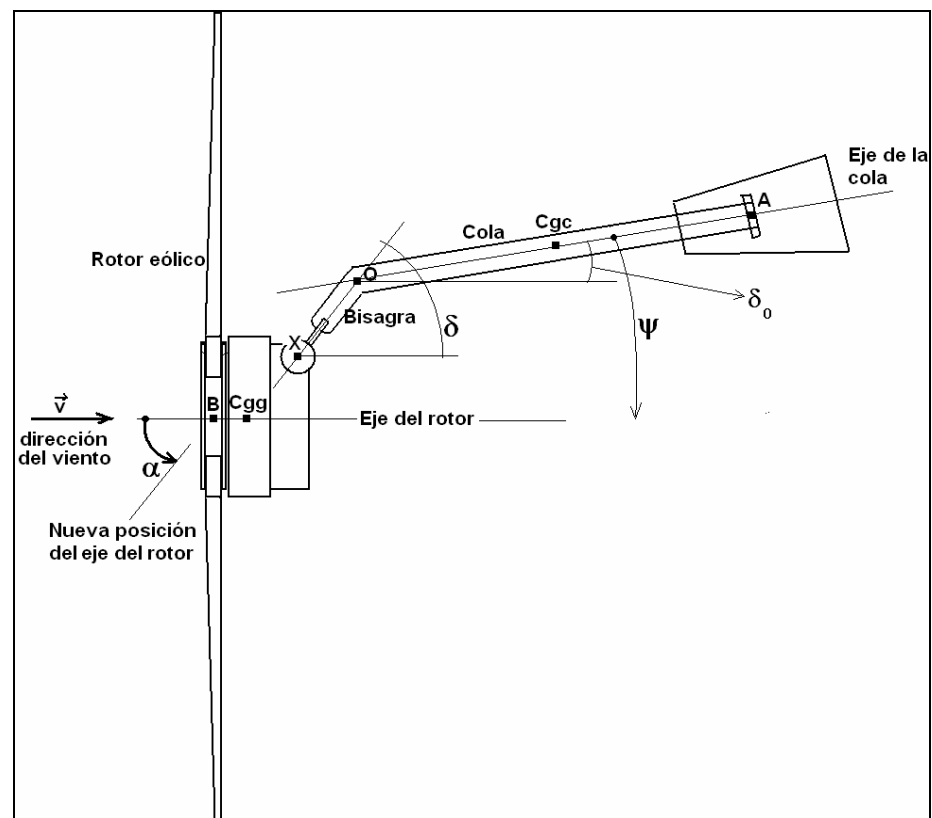


Fig. 6.2. Vista en planta de la estructura con los parámetros característicos del estudio.



➤ Características y variables de la estructura:

– Existen dos puntos de rotación: uno para la cola (el punto O) y uno para todo el sistema (el punto X). De manera que se consideran dos sistemas, uno el formado únicamente por la cola y otro el global que incorpora la cola y el rotor.

– El sistema de referencia es móvil y solidario con el rotor.

– Se define \mathbf{v} como el vector velocidad del viento (**variable de entrada**).

– Se define el **ángulo** como el ángulo relativo entre la dirección del viento y el eje normal del rotor eólico (**incógnita**).

– Se define el **ángulo** como el ángulo relativo entre el eje del rotor y la cola (**incógnita**).

– Se define ϕ como el ángulo de incidencia del viento sobre la veleta y se calcula como la suma de α , ψ y δ_0 .

➤ Parámetros de diseño del aerogenerador:

– Se define el ángulo horizontal entre el eje del rotor y la bisagra como $\delta = 10^\circ$

– Se define el ángulo horizontal inicial entre el eje del rotor y el eje de la cola como $\delta_0 = 10^\circ$

– Se define el ángulo vertical entre el eje del rotor y la bisagra como $\beta = 20^\circ$

– Se define la longitud de la cola (distancia OA) como $L_c = 1,2$ m

– Se define la distancia del punto O al centro de gravedad del conjunto cola-veleta como $L_{cg} = 0,853$ m.

– Masa del generador $m_A = 26,719$ kg

– Masa de la cola (veleta incluida) $m_C = 4,486$ kg

– Densidad del aire $\rho = 1,2$ kg/m³

– Superficie de la veleta $S_c = 0,45$ m²

– Superficie abarcada por las palas $S = 2,27$ m²

– Fuerza de la gravedad $g = 9,81$ m/s²

– Vector distancia de X a B en la base 0, $\overrightarrow{XB}^0 = \begin{Bmatrix} -0,197 \\ -e \\ -0,031 \end{Bmatrix} (m)$

– Vector distancia de X a O en la base 0, $\overrightarrow{XO}^0 = \begin{Bmatrix} 0,067 \\ 0,012 \\ 0 \end{Bmatrix} (m)$



- Vector distancia de X a C_{gg} en la base 0, $\overrightarrow{XC_{GG}} = \begin{Bmatrix} -0,099 \\ -e \\ -0,031 \end{Bmatrix}$ (m)
- Excentricidad del eje del rotor respecto del eje del mástil, $e = 0,125$ m

➤ Hipótesis de cálculo:

- No hay momento resistente para ninguno de los dos puntos de rotación (es decir que no considera fricción).
- Se considera que el vector viento no se modifica una vez ha cruzado el rotor e impacta sobre la cola (es decir, que se toma la misma velocidad para ambos sistemas).
- Se imponen unos coeficientes de fricción independientes de la velocidad y de las propiedades físicas tanto del aire como de los materiales.
- Se supone una velocidad del viento incidente horizontal.
- Se supone un coeficiente concreto para el cálculo del empuje del viento sobre las palas.
- Toda la veleta está contenida en el mismo plano (plano de rotación sobre el eje ψ - horizontal y vertical-) tal y como es el aerogenerador IT-100 de ITDG. Tanto en la descripción como en el manual de construcción del aerogenerador del presente proyecto, sin embargo, se ha tenido en cuenta el diseño más moderno de Hugh Piggott, el cual no tiene la veleta contenida en el plano bisagra-botavara, que es de mayor complejidad y desde aquí se propone estudiar en futuros proyectos.

➤ Movimiento:

El momento que provoca el viento sobre las palas hará rotar todo el aerogenerador (generador con el rotor eólico y la montura incluidos) respecto al viento un ángulo α . Para compensar este movimiento, la cola rotará un ángulo ψ (ángulo relativo rotor-cola).

➤ Objetivo del estudio:

Encontrar la relación entre α y ψ en función de la velocidad del viento incidente, para unos parámetros dimensionales determinados. Conocer esta relación permite un análisis de sensibilidad de la variación de ciertos parámetros para poder en un futuro estudio redimensionar el mecanismo y modificar los materiales y conseguir mejorar el funcionamiento del mecanismo de orientación.



➤ Método:

El método de estudio es aplicar los conceptos básicos de la mecánica de medios continuos con tal de evaluar los momentos generados tanto en la cola como en el rotor. Considerando que las dos rotaciones permitidas no tienen pérdidas por rozamientos, se puede imponer que en ambos ejes el momento resultante es nulo. Para poder aplicarlo, es necesario realizar un balance exclusivo de la cola mediante cambios de base de los sistemas de coordenadas y un segundo balance exclusivo del sistema completo.

6.2. Metodología

➤ Paso 0:

El sistema de coordenadas inicial (base 0) corresponde a un eje n_3^0 vertical (paralelo al mastil) y positivo hacia arriba, un eje n_1^0 horizontal y paralelo al eje del rotor con sentido del viento y un eje n_2^0 horizontal y perpendicular al eje del rotor.

➤ Paso 1:

Orientamos el sistema de coordenadas con tal de tener el eje n_2^1 normal a la pala de la cola, por tanto se realiza un giro sobre el eje n_3^0 de δ grados en el sentido positivo (base I). Posteriormente se realiza un segundo giro sobre el nuevo eje n_2^1 de β grados positivo para tener un n_3^2 paralelo al eje de rotación de la cola (base II).

Finalmente siguiendo la cola a medida que se reorienta debido al viento incidente. La cola se mueve sobre el eje n_3^2 en sentido negativo con un ángulo ψ variable (base III).

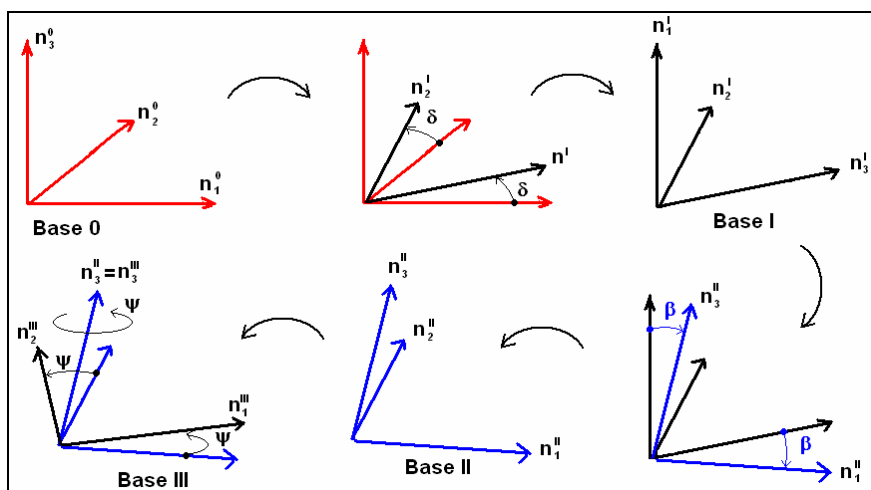


Fig. 6.3. Obtención de las diferentes bases mediante los giros δ , β y ψ .



La matrices de cambio de base son (definiendo por ejemplo C_{0-I} como la matriz de cambio de base de la base 0 a la base I):

$$C_{0-I} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta & 0 \\ -\sin\delta & \cos\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

$$C_{I-II} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

$$C_{II-III} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Por tanto, para pasar un vector de la base 0 a la base III se aplica la siguiente expresión:

$$\mathbf{v}^{III} = C_{II-III} C_{I-II} C_{0-I} \mathbf{v}^0 \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Y para convertir un vector de la base III a la base 0 se aplica la siguiente expresión:

$$\mathbf{v}^0 = C^T_{0-I} C^T_{I-II} C^T_{II-III} \mathbf{v}^{III} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

6.2.1. Balance de fuerzas sobre la cola, en la base III:

➤ Paso 2:

Se calculan en la base III las fuerzas sobre la cola considerando la fuerza que ejerce el viento sobre la veleta:

$$F^{III}_{v,vel,i} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_{D,i} \cdot |v^{III}_i| \cdot v^{III}_i \cdot S_C \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Donde:

$F^{III}_{v,vel,i}$: componente i de la fuerza del viento sobre la veleta (N)

ρ : densidad del aire (kg/m³)

$C_{D,i}$: componene i del coeficiente de Drag

\mathbf{v}^{III} : vector velocidad en la base III

S_C : superficie total de la veleta de la cola (m²)

Debido a que la componente n^{III}_2 de la velocidad es normal a la superficie de la veleta de la cola, se considera que la compente $C_{D,2} \approx 1$ mientras que las otras componentes $C_{D,1,3}$ se pueden menospreciar.



La velocidad expresada en la base III se calcula como:

$$\vec{v}^{III} = C_{III-II} \cdot C_{II-I} \cdot C_{I-0} \cdot v \cdot \begin{Bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

v : módulo de la velocidad del viento (m/s)

α : ángulo relativo entre la dirección del viento y el eje normal del rotor eólico (°)

Así pues, con las ecuaciones Ec. 6.7 y Ec. 6.1, Ec. 6.2 y Ec. 6.3, la velocidad expresada en la base III es:

$$\vec{v}^{III} = \begin{Bmatrix} v(\cos \alpha \cos \psi \cos \beta \cos \delta - \cos \alpha \sin \psi \sin \delta - \sin \alpha \cos \psi \cos \beta \sin \delta - \sin \alpha \sin \psi \cos \delta) \\ -v(\cos \alpha \sin \psi \cos \beta \cos \delta + \cos \alpha \cos \psi \sin \delta - \sin \alpha \sin \psi \cos \beta \sin \delta + \sin \alpha \cos \psi \cos \delta) \\ \sin \beta \cdot v(\cos \alpha \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta) \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.8})$$

Conociendo la velocidad y el coeficiente de arrastre, la fuerza del viento sobre la veleta queda definida con la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_{v,vel}^{III} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0,5 \cdot \rho \cdot S_C \cdot v_{2}^{III} \cdot |\vec{v}_{2}^{III}| \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.9})$$

La otra fuerza que actúa es el peso de toda la cola (veleta incluida):

$$F_{w,C,i}^{III} = m_C \cdot g_i^{III} \quad (\text{Ec. 6.10})$$

$F_{w,C,i}^{III}$: componente i de la fuerza del peso de la cola expresada en base III (N)

m_C : masa de la cola con la veleta (kg)

El vector gravedad en la base III se obtiene de la siguiente expresión:

$$\vec{g}^{III} = C_{III-II} \cdot C_{II-I} \cdot C_{I-0} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.11})$$

g : módulo de la gravedad (m/s^2)

Por tanto, aplicando las ecuaciones Ec.6.10 y Ec.6.11, se obtiene la expresión del peso de la cola en la base III:



$$F_{w,C}^{III} = \begin{Bmatrix} m_C \cdot g \cdot \cos \psi \sin \beta \\ -m_C \cdot g \cdot \sin \psi \sin \beta \\ -m_C \cdot g \cdot \cos \beta \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.12})$$

Conociendo las distancias de los puntos de aplicación de las fuerzas (empuje del viento a la veleta y peso de la cola) respecto el punto de rotación de la cola se puede evaluar el momento $\overset{P}{M}^{III}$ (Nm) que efectúa la cola sobre el eje de rotación (paralelo al eje n_{3}^{III}) como el siguiente producto vectorial de fuerza por distancia:

$$\overset{P}{M}_{COLA}^{III} = OA \wedge \overset{P}{F}_{v,vel} + OC_{GC} \wedge \overset{P}{F}_{w,C} \quad (\text{Ec. 6.13})$$

O: punto de soldadura de la cola, donde se aplica el balance del sistema cola

OA: vector distancia del centro de gravedad de la veleta al punto O (m)

OC_{GC}: vector distancia del centro de gravedad C_{GC} de la cola (con veleta) al punto O (m)

La distancia OA se puede calcular en la base III como:

$$OA^{III} = \begin{Bmatrix} L_C \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta \\ -L_C \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.14})$$

La distancia OC_{GC} se puede calcular en la base III como:

$$OC_{GC}^{III} = \begin{Bmatrix} L_{CG} \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta \\ -L_{CG} \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.15})$$

Una vez calculado con la Ec. 6.13 el momento resultante que ejerce la cola sobre el eje de rotación de la bisagra (en la dirección de n_{3}^{III}) e imponiendo que la tercera componente del momento sea nula (debido al giro libre sobre el eje n_{3}^{III}) se puede encontrar una **relación entre la velocidad incidente v, el ángulo α y el ángulo φ** . Esta relación será la primera ecuación del sistema.



6.2.2. Balance de fuerzas y momentos sobre el sistema completo, en la base 0:

➤ Paso 3:

Se realiza un estudio sobre el sistema completo teniendo en cuenta tanto la cola como las palas y se hace sobre la base 0. Para tener en cuenta el estudio realizado previamente, hay que tener en cuenta la acción del momento resultante de la cola, en la base 0.

Además al tener en cuenta el sistema global, ahora aparecen dos fuerzas más, correspondientes a la ocasionada por el viento en las palas y al peso del generador (incluido el rotor eólico). En este caso, sin embargo, la fuerza que hace el viento sobre las palas es más compleja debido a la rotación de éstas y a su propia geometría. Existen diferentes expresiones para el cálculo de esta fuerza, una de ellas es:

$$F_{v,rotor,i}^0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i \cdot |v_i^0| \cdot v_i^0 \cdot S \quad (\text{Ec. 6.16})$$

Donde:

$F_{v,rotor,i}^0$: componente i de la fuerza del viento sobre las palas (N)

ρ : densidad del aire (kg/m³)

S: superficie abarcada por el rotor eólico (palas) (m²)

C_i : coeficiente de empuje del viento sobre las palas. Se ha tomado el valor de 4/9 suponiendo que el aprovechamiento del viento en el rotor eólico es máximo.

v_i^0 : vector velocidad en la base 0, que aparece en la Ec. 6.7 como: $\begin{Bmatrix} v \cdot \cos \alpha \\ -v \cdot \sin \alpha \\ 0 \end{Bmatrix}$

Pero se desprecian las componentes tangenciales de esta fuerza del viento sobre las palas y se obtiene finalmente que su valor es:

$$F_{v,rotor}^0 = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{4}{9} \cdot |v_i^0| \cdot v_i^0 \cdot S \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6.17})$$

La otra fuerza que actúa es el peso del aerogenerador excepto la cola y la torre:

$$F_{w,a,i}^0 = m_A \cdot g_i^0 \quad (\text{Ec. 6.18})$$

$F_{w,a,i}^0$: componente i de la fuerza del peso del aerogenerador expresado en base 0 (N)

m_A : masa del generador (con rotor eólico) (kg)



g^0 : vector gravedad en la base 0 que aparece en la Ec. 6.9 como: $\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{Bmatrix}$

Conociendo las fuerzas del empuje del viento sobre las palas, el peso del generador, el momento resultante de la cola, y la fuerza resultante de la cola, se obtiene en base 0:

$$\dot{M}_{TOT}^0 = \dot{M}_{COLA}^0 + XB \wedge \dot{F}_{v,rotor} + XC_{GG} \wedge \dot{F}_{w,a} + XO \wedge \dot{F}_{COLA} \quad (\text{Ec. 6.19})$$

\dot{M}_{TOT}^0 : momento total sobre el eje del tubo de viraje (Nm)

\dot{M}_{COLA}^0 : momento resultante de la cola en base 0 (Nm)

X: punto donde se aplica el balance del sistema completo, en el eje del tubo de viraje y a la misma altura que el punto O.

XB : vector distancia del punto X al B (centro del rotor eólico) (m)

XC_{GG} : vector distancia del punto X al C_{GG} (centro de gravedad del generador) (m)

XO : vector distancia del punto X al punto O (m)

\dot{F}_{COLA} : Fuerza resultante de la cola en base 0 (Nm)

Como la tercera componente de este momento total ha de ser nula, se encuentra la segunda **relación entre el ángulo α y el φ en función de la velocidad del viento v** ; esta expresión será la segunda ecuación del sistema.

➤ Paso 4:

Se tienen dos ecuaciones y dos incógnitas (α y φ):

$$M_{COLA}^{III}[3] = f_1(v, \alpha, \varphi) = 0$$

$$M_{TOT}^0[3] = f_2(v, \alpha, \varphi) = 0$$

Mediante un sistema iterativo se pueden encontrar los dos ángulos incógnitas para cada velocidad del viento v . Hemos creado este sistema iterativo en una hoja Excel que calcula los ángulos incógnita para una determinada velocidad de entrada del viento y para unos parámetros dimensionales constantes determinados del mecanismo.



6.2.3. Resultados

Se ha resuelto el sistema de ecuaciones mediante un solver iterativo en una hoja excel, de manera que, si se impone una velocidad del viento incidente v , se obtienen los valores de los ángulos α y ψ para dicha velocidad. Recordemos que se ha definido el ángulo ϕ como el relativo veleta-viento, y es el que se necesita para evaluar el coeficiente de Drag en la cola.

En la tabla 6.1 se exponen los valores de los tres ángulos nombrados en el párrafo anterior, en función del valor de la velocidad del viento:

v [m/s]	α	φ	ϕ
10,5	40,77	-30,86	19,91
10	39,33	-28,94	20,39
9,5	37,85	-26,99	20,86
9	36,35	-25,01	21,34
8,5	34,82	-23,00	21,82
8	33,28	-20,99	22,29
7,5	31,74	-18,98	22,76
7	30,20	-16,98	23,22
6,5	28,67	-15,01	23,66
6	27,18	-13,09	24,09
5,5	25,74	-11,25	24,49
5	24,34	-9,48	24,87
4,5	23,03	-7,81	25,22
4	21,81	-6,28	25,53
3,5	20,68	-4,87	25,81
3	19,68	-3,61	26,06
2,5	18,78	-2,54	26,25
2	18,08	-1,63	26,44
1,5	17,48	-0,93	26,55
1	16,90	-0,41	26,50
0,5	16,69	-0,10	26,59
0	0,00	0,00	10,00

Tabla 6.1. Resultados obtenidos mediante el solver en la tabla excel.

En la Fig. 6.4 se muestra la evolución de los ángulos α , φ y ϕ en función del viento incidente. Se observa como la cola mantiene casi constante su orientación respecto el viento mientras que el rotor se reorienta considerablemente. También se ha observado que para velocidades menores de 0.3 m/s, no hace falta autocorrección de la orientación del rotor.



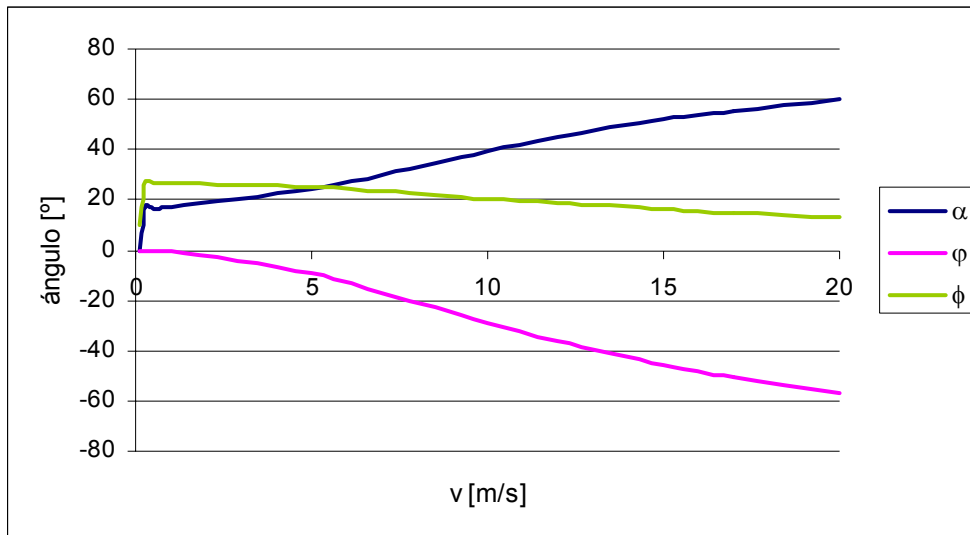


Fig. 6.4. Evolución de los ángulos α , φ y ϕ en función de la velocidad del viento.

En la figura 6.5 se muestra la evolución de la fuerza normal a la veleta en función de la velocidad del viento. Se observa como la fuerza aumenta exponencialmente para velocidades pequeñas pero, a medida que la velocidad del viento es considerable, la reorientación de las aspas respecto del viento es mayor (α mayor) y, por tanto, la fuerza normal aumenta mucho más suavemente hasta un valor asintótico al rededor de 7,5 N, para el diseño estudiado.

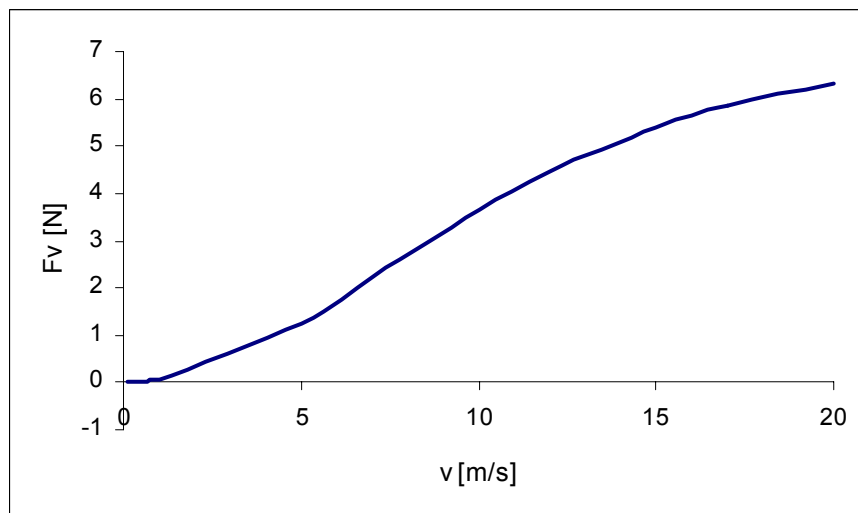


Fig. 6.5. Fuerza normal de la veleta en función de la velocidad del viento.



En la figura 6.6 se observa el movimiento de la cola para una velocidad de 10,5 m/s.

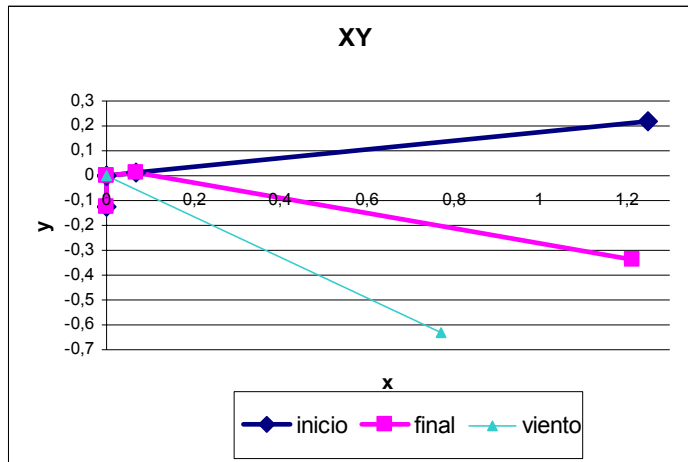


Fig. 6.6. Representación en el plano XY del movimiento de la cola.

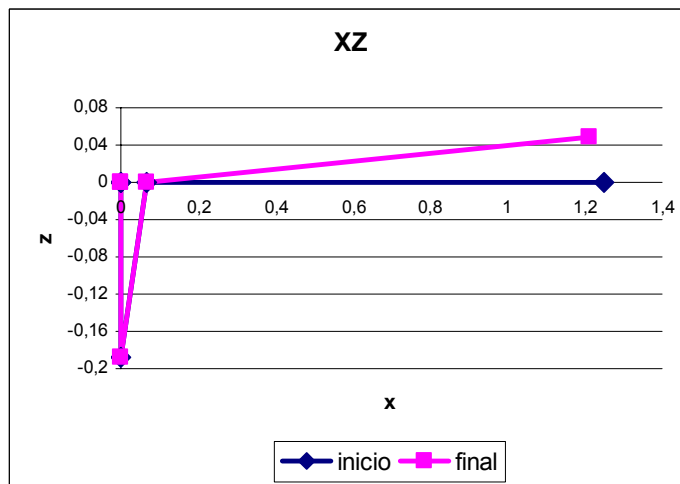


Fig. 6.7. Representación en el plano XZ del movimiento de la cola.

Se observa como a medida que la cola se desplaza con un ángulo $\psi < 0$, la posición de ésta es más elevada (la fuerza del viento supera la de la gravedad).

Se ha observado la elevada influencia de los dos coeficientes de la fuerza del viento en los resultados. Sería interesante realizar un estudio con más detalle para evaluar con más precisión ambos coeficientes. También sería conveniente optimizar parámetros geométricos como el peso y longitud de la cola, el peso y superficie de la veleta, el diámetro del rotor eólico, la excentricidad, etc, para obtener un mejor aprovechamiento de la velocidad del viento sin comprometer la seguridad del aerogenerador.



7. ESTUDIO DE VIABILIDAD ENERGÉTICA

7.1. Energía necesaria para la construcción del aerogenerador

El objetivo de este capítulo es el de calcular la energía necesaria para construir el aerogenerador especificado en el manual de construcción del aerogenerador del Anexo F. Para ello se ha creído conveniente separar el gasto energético en dos grupos fundamentales.

El primero de ellos es el apartado en el que se tiene en cuenta la energía incorporada a los materiales, por el hecho de extraerlos, concentrarlos, adecuarlos y transportarlos hasta el lugar de construcción.

En segundo lugar, se ha tenido en cuenta otro concepto de gasto energético derivado de la construcción del aerogenerador, es la energía consumida en las tareas realizadas en los diferentes procesos de construcción que se han llevado a cabo, sin tener en cuenta en esta partida, la energía aportada directamente por el trabajo de manufactura de los operarios.

7.1.1. Energía incorporada a los materiales

Aunque no existe un método estándar para el cálculo de la energía incorporada en los materiales de construcción, sí existe una definición generalmente aceptada: “la energía incorporada de un material incluye toda la que se necesitó en los distintos procesos necesarios para llevar el material a su lugar en los establecimientos pertinentes: desde la extracción de las materias primas, hasta su manufactura; incluye la energía asociada al transporte (y a la parte proporcional de la infraestructura necesaria para que éste sea posible), así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarios para todos esos procesos”. [13]

Todos estos conceptos se han tenido en cuenta para obtener los factores de energía que permitan calcular la energía incorporada a un material, en función de su masa, según una serie de autores que se indican unas líneas más adelante.

Hay que decir que se han considerado los materiales tanto de la construcción del aerogenerador como de los moldes y plantillas necesarios. No obstante se han considerado los materiales más significativos en cuanto a importancia energética y de masa, es decir que se ha confeccionado una lista prácticamente igual a la lista de materiales, pero no es exactamente la lista completa.



El cálculo de la energía incorporada a un material, por lo tanto, será tan sencillo como multiplicar el factor de energía incorporada a ese tipo de material (kWh/kg) por la masa de material utilizado en la construcción del aerogenerador. De manera que la expresión utilizada para el cálculo de la tercera columna de la tabla 7.1 es:

$$E = \frac{F_{EI} \cdot M}{1000} \quad (\text{Ec.7.1})$$

Donde:

E: energía consumida para fabricar una cantidad de material determinado (kWh)

F_{EI} : factor de energía incorporada a un tipo de material (kWh/kg)

M: masa consumida de un tipo determinado de material (g)

1000: conversión de g a Kg.

Se han tenido en cuenta principalmente los siguientes tipos de materiales:

Acero, acero reutilizado, acero inoxidable, resina, aluminio, cobre, plástico y madera.

De tal modo que se obtienen los resultados presentados en la siguiente página:



MATERIALES AEROGENERADOR	Peso (g)	Factor de Energía (KWh/kg) [13]	Energía (kWh)
ENCASTAMIENTO			
Resina con catalizador incorporado	2.450	24	58,8
ACERO			
Barra roscada M8	125	11	1,375
Barra roscada M10	480	11	5,28
Tuercas M5	3	11	0,033
Tuercas M6	30	11	0,33
Tuercas M8	75	11	0,825
Tuercas M10	479	11	5,269
Arandelas M10 (0,5mm espesor)	8	11	0,088
Tornillos M5 x 40	9	11	0,099
Tornillos M6 x 70	246	11	2,706
Tornillos M10	214	11	2,354
Tubo de 150 mm	206	11	2,266
Tubo de 200 mm	235	11	2,585
Tubo de 300 mm	648	11	7,128
Tubo de 1200 mm	1883	11	20,713
Plancha de acero	6.654	11	73,194
Ángulos montura buje	2684	11	29,524
Ángulos soporte	880	11	9,68
Anillo	167	11	1,837
Trapecio	296	11	3,256
Barra (300x30x8mm)	562	11	6,182
ACERO REUTILIZADO			
Buje	1555	4,7	7,3085
Eje	800	4,7	3,76
MATERIAL PARA SOLDADURA	65	11	0,715
ELEMENTOS ELÉCTRICOS			
Hilo de cobre esmaltado (cobre)	2671	25	66,775
Cable flexible (cobre)	83	25	2,075
Rectificadores (plástico)	50	30	1,5
Disipador de Calor (Aluminio)	250	52	13,000
OTROS			
Alambre de acero inoxidable	245	15	3,675
MADERA			
Madera de las palas	2331	1,25	2,91375
Discos de 300mm de diámetro x 8mm	758	1,25	0,9475
Madera contrachapada	1890	1,25	2,3625
Coste energético total de los materiales del aerogenerador (kWh)			338,556
MATERIALES DE MOLDES Y PLANTILLAS			
MADERA			
Tabla de compuesto de madera	16833	1,25	21,04125
Tabla de compuesto de madera	293	1,25	0,36625
Tabla de compuesto de madera	280	1,25	0,35
Madera contrachapada	413	1,25	0,51625
ACERO			
Placa (60x30x6mm)	84	11	0,924
Placa (125x125x1mm)	122	11	1,342
Tornillos M6 x 60	28	11	0,308
Tornillos M10 x 70	189	11	2,079
Tornillos M12 x 150	139	11	1,529
Tuercas M6	4	11	0,044
Tuercas M8	25	11	0,275
Tuercas M10	38	11	0,418
Tuercas M12	14	11	0,154
Arandelas M6	2	11	0,022
Arandelas M10	20	11	0,22
Arandelas M12	7	11	0,077
Barra tubular hueca	196	11	2,156
Coste energético total de los materiales de moldes y plantillas (kWh)			31,822
ENERGÍA TOTAL (kWh)			370,378

Tabla 7.1. Energía incorporada a los materiales.



7.1.2. Consumo total de energía

Una vez calculados los consumos energéticos debidos a la incorporación del material y con los resultados obtenidos en el Anexo H referentes al consumo energético de los procesos constructivos del aerogenerador, se obtiene la Tabla 7.2 como resumen con el consumo total de energía que supone la construcción de un aerogenerador por primera vez y también el coste energético de construcción de los siguientes aerogeneradores.

El consumo de energía de construcción del primer aerogenerador lleva incorporados el término de consumo energético debido a la obtención de los materiales del aerogenerador, de sus moldes y plantillas, y un segundo término relacionado con el consumo energético de los procesos realizados en taller para la manufactura del aerogenerador así como para la manufactura de los moldes.

Por otra parte, el consumo de energía de los siguientes aerogeneradores se obtiene como resultado de la suma de la energía incorporada únicamente a los materiales del aerogenerador por un lado, y por otro a la energía consumida en los procesos de manufactura del aerogenerador, que se puede suponer que es la mitad de la energía consumida en taller para el primer aerogenerador.

CONSUMOS ENERGÉTICOS [kWh]	
Consumo energético del proceso de torneado de madera	0,002 kWh
Consumo energético del proceso de corte de acero	0,025 kWh
Consumo energético del proceso de corte de madera	0,025 kWh
Consumo energético del proceso de taladrado de madera	0,104 kWh
Consumo energético del proceso de taladrado de acero	3,383 kWh
Consumo energético del proceso de soldadura de estaño	0,001 kWh
Consumo energético del proceso de soldadura oxiacetilénica	2,169 kWh
Energía total consumida en procesos de construcción en taller	5,709 kWh
Energía incorporada a los materiales del aerogenerador	338,556 kWh
Energía incorporada a los materiales de moldes y plantillas	31,822 kWh
ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA en el primer aerogenerador (E_{TC1})	376,087 kWh
ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA en los siguientes aerogeneradores (E_{TC2})	341,411 kWh

Tabla 7.2. Consumo total de energía en la construcción del aerogenerador.

Observando la tabla 7.2 se puede concluir finalmente, que los valores energéticos a tener en cuenta son los siguientes:

Energía consumida en el primer aerogenerador, $E_{TC1} = 376,087 \text{ kWh}$

Energía consumida en los siguientes aerogeneradores, $E_{TC2} = 341,411 \text{ kWh}$



7.2. Energía generada por el aerogenerador

Para poder realizar el estudio de viabilidad energética, es necesario realizar una previsión de la energía media generada en un día.

A este valor de energía media generada diaria, se le va a denominar E_g y tiene unas unidades de kWh/día. Para poder calcular el valor de esta magnitud para el aerogenerador descrito en este proyecto, se tomará el valor de la energía anual generada $E_{g,año}$ (kWh) y se dividirá por los días del año, es decir 365 h.

7.2.1. Estimación de la potencia eléctrica media anual

Para poder estimar la potencia media anual que se tiene a la salida del aerogenerador, es indispensable saber o suponer un lugar donde se pretende colocar el aerogenerador para su funcionamiento, ya que dependiendo de la localización del aerogenerador se tendrá un promedio de velocidad del viento muy diferente que es el que determina la potencia media anual que genera el aerogenerador.

Para trabajar con más certeza en esta previsión se va a suponer que el emplazamiento del aerogenerador es el km 125 de la panamericana norte (Lima-Huacho), donde se ha realizado un amplio estudio de trabajo de campo con un aerogenerador idéntico al que se trate en el proyecto. Además se conoce la distribución de frecuencia de velocidades del viento expresada en la tabla 7.4 que muestra el número de horas al año que se tiene cada velocidad del viento.

Basándonos en los resultados obtenidos en la hoja Excel desarrollada por nosotros, mostrados en el gráfico 5.7, donde se muestra la potencia en corriente continua ingresada en la batería en función de la velocidad del viento para el PMG de Neodimio, se obtiene la tercera columna de la tabla 7.3 con la potencia correspondiente a cada velocidad, P_i (W).

Conociendo la potencia de cada intervalo de velocidad del viento, y el número de horas que se tiene dicha potencia, se puede calcular la cuarta columna de la tabla 7.3, que es la energía generada en todo el año para una velocidad del viento concreta, con la siguiente expresión:



$$E_i = \frac{P_i \cdot t_i}{1000} \quad (\text{Ec.7.2})$$

E_i = energía generada anualmente para el intervalo de velocidad del viento i (kWh)

P_i = potencia eléctrica de salida para la velocidad de viento del intervalo i (W)

T_i = número de horas al año en las que se tiene la velocidad del viento del intervalo i (h)

v (m/s)	t _i (horas)	P _i (W)	E _i (kWh)
0	284,04	0	0
0,5	170,20	0	0
1	273,24	0	0
1,5	278,98	0	0
2	330,05	0	0
2,5	410,64	0	0
3	473,84	0	0
3,5	590,53	0	0
4	682,57	4,06	2,77
4,5	668,25	19,83	13,25
5	651,53	36,66	23,89
5,5	628,84	54,84	34,49
6	616,52	72,50	44,70
6,5	591,19	88,64	52,40
7	572,70	100,48	57,54
7,5	502,90	107,95	54,29
8	436,62	112,96	49,32
8,5	295,70	116,03	34,31
9	158,31	117,43	18,59
9,5	80,59	116,83	9,42
10	32,14	113,75	3,66
10,5	14,97	-	0
11	7,93	-	0
11,5	3,08	-	0
12	1,10	-	0
12,5	0,44	-	0
13	0,00	-	0
TOTAL	8756,91		398,62

Tabla 7.3. Columnas 1 y 2: frecuencia de la velocidad del viento en el km 125 panamericana Huacho [11]; columnas 3 y 4 elaboración propia.

La suma del total de las energías E_i anuales para cada intervalo de velocidad da como resultado la energía anual generada.

Observando la tabla 7.3, la energía anual generada es de:

$$E_{g,\text{año}} = 398,62 \text{ kWh/año}$$

Por tanto, la energía media diaria generada es de:

$$E_g = 398,62/365 = 1,092 \text{ kWh/día}$$



7.3. Conclusiones

El estudio de viabilidad energética del aerogenerador sirve para calcular el tiempo necesario para que el aerogenerador abastezca de la energía suficiente para que sea posible su propia construcción.

Desde un punto de vista medioambiental es muy importante que el tiempo no sea muy elevado, puesto que si se requiere de mucho tiempo en la fase de funcionamiento para poder generar la energía equivalente a la incorporada a la construcción del aerogenerador, significa que no merece la pena construirlo y entonces la premisa de que el aerogenerador es un buen medio para abastecer a poblaciones sin red eléctrica entra en debate y es importante estudiar la viabilidad de empezar a construir infraestructuras eléctricas en lugar de este tipo de energías.

Es importante comentar que se ha tenido en cuenta que la generación de energía eléctrica es en un lugar determinado con un viento medio determinado y que este factor determina de manera importante la energía media diaria generada, de manera que si se tiene en cuenta que la fase de funcionamiento se va a llevar a cabo en otra localización, la generación de energía será diferente y por tanto el tiempo de retorno y la viabilidad energética también.

En este caso, para poder valorar lo comentado en el párrafo anterior, se va a calcular el tiempo necesario para generar la energía que ha consumido la construcción del aerogenerador.

7.3.1. Cálculo del tiempo de retorno energético

El tiempo de retorno energético, o tiempo en el que se genera la cantidad de energía que se ha consumido en la construcción del aerogenerador se calcula como el cociente entre la energía total consumida por la construcción del mismo y la energía generada diaria. De manera que para el primer aerogenerador se puede calcular como:

$$T = \frac{E_{TC1}}{E_g} \quad (\text{Ec.7.3})$$

T: tiempo de retorno energético del primer aerogenerador (días)

E_{TC1} : energía total consumida en la construcción del primer aerogenerador (376,087 kWh)

E_g : energía media diaria generada (1,092 kWh/día)



En este caso será:

$$T = 345 \text{ días}$$

Por tanto el tiempo de retorno energético será aproximadamente de 1 año (11 meses y medio).

Para los siguientes aerogeneradores, el tiempo de retorno energético se puede calcular como:

$$T = \frac{E_{TC2}}{E_g} \quad (\text{Ec.7.4})$$

E_{TC2} : energía total consumida en la construcción del primer aerogenerador (341,411 kWh)

E_g : energía media diaria generada (1,092 kWh/día)

En este caso será:

$$T = 313 \text{ días}$$

Por tanto el tiempo de retorno energético será aproximadamente de 10 meses y dos semanas.

Este tiempo puede considerarse pequeño para la vida útil que se espera del aerogenerador, que se estima que es de unos veinte años [8].

Por otra parte, el viento que se produce en la región de estudio, se puede clasificar como brisa lenta (nivel 3) según la escala de Beaufort [8], ya que la mayor parte del tiempo, la velocidad del viento suele estar entre 3,5 y 6 m/s. Si el aerogenerador se instalara en zonas con regimenes de viento más elevados, se podría reducir el tiempo de retorno energético en varios meses. Se puede afirmar que el aerogenerador de imanes permanentes de Neodimio descrito en el presente proyecto, desde el punto de vista energético es totalmente sostenible.



8. ESTUDIO MEDIO AMBIENTAL Y SOCIAL

8.1. El impacto ambiental de la energía eólica

En este apartado se recogen, de modo sucinto, algunos aspectos relativos al impacto general de la energía eólica con el fin de enmarcar el conjunto del estudio en el plan adecuado. El primer aspecto a destacar es el hecho de que la producción de electricidad a partir del viento es un proceso “limpio” tal y como es aplicado el término actualmente, es decir, que elimina la contaminación en el origen y no al final del proceso a través de costosas medidas correctoras. A diferencia de otras fuentes convencionales, la producción de energía eólica no provoca la emisión de grandes cantidades de contaminantes atmosféricos, ni un gran volumen de residuos sólidos.

A la hora de cuantificar la contaminación evitada por la sustitución de fuentes de energías no renovables por energía de origen eólico aparecen varias dificultades: por una parte, resulta difícil valorar las emisiones asociadas a todo el proceso de producción de la energía ya que debe incluir tanto los procesos de extracción del combustible, la construcción de las instalaciones de producción, la operación y mantenimiento, y el tratamiento de los residuos finales. Por otra parte, una vez obtenidos estos datos su extrapolación a otros espacios geográficos puede ser también compleja ya que los procesos pueden variar de forma importante. No obstante se han realizado importantes estudios que pueden dar una idea de la contaminación evitada por la instalación de un parque eólico. Según los datos conocidos, realizaremos una interpolación para nuestro caso de manera que conozcamos de manera aproximada el valor de la cantidad de emisiones reducidas.

8.1.1. Ahorro de emisiones

Según datos obtenidos en Alemania, el ahorro en la emisión de contaminantes por la generación de electricidad de origen eólico en sustitución de las fuentes utilizadas en aquel país es la siguiente (los datos están expresados en kg por MWh producido anualmente):

Contaminante	Cantidad [kg/MWh]
NO _x	6,18
SO ₂	7,84
Cenizas y Escorias	70,15
CO ₂	1250
Barril petróleo	1,76

Tabla 8.1. Ahorro de emisiones por generación eólica de electricidad [16]



A estos datos habría que añadir las emisiones de metales pesados de las centrales térmicas de carbón, los residuos sólidos de la minería y los residuos radiactivos de las centrales nucleares.

A partir de estos datos, el ahorro anual de contaminantes emitidos a la atmósfera, generación de residuos y ahorro de petróleo, a causa de instalar el aerogenerador de baja potencia en una zona concreta (ver página 98, la energía anual generada), teniendo en cuenta que se generan 398,62 kWh al año, será:

Contaminante	AHORRO
NO _x	2,463 kg/año
SO ₂	3,125 kg/año
Cenizas y Escorias	27,963 kg/año
CO ₂	498,275 kg/año
Barril de Petróleo	0,702 unidades

Tabla 8.2. Ahorro de emisiones anual debido a la generación de energía del aerogenerador.

Lógicamente al tratarse de un aerogenerador de baja potencia las cantidades no emitidas son pequeñas, lo importante es que no sólo no se emiten contaminantes a la atmósfera si no que además por poco que sea, se consigue generar energía que de otro modo contaminaría.

Aunque no se dispone de estudios tan completos adaptados a la situación energética Española, si se comparan las emisiones generadas en las centrales térmicas de España con las correspondientes en Alemania (de donde se han obtenido los ahorros de emisión por MWh generado) puede afirmarse que, las emisiones de SO₂ en las centrales españolas son varias veces superiores a las de las centrales alemanas. Con lo cual, producir con energía eólica un MWh en España supone un ahorro de 15,68 kg de emisión de SO₂.

Uno de los efectos más conocidos derivado, de entre otras cosas, de la emisión de CO₂ a la atmósfera es el efecto invernadero causante a su vez del aumento global de la temperatura del planeta. La reducción de emisiones de CO₂ pasa por el ahorro energético y por la sustitución de las fuentes de energía que utilizan combustibles fósiles por fuentes de energía renovables.



Además de la emisión de contaminantes hay que tener en cuenta, y más en la zona donde nos encontramos, el consumo del agua que algunas fuentes de generación de energía requieren. Las aguas de lavado del carbón utilizado en las centrales térmicas son retornadas al medio con un elevado grado de contaminación a causa de la gran cantidad de sólidos en suspensión que contienen. A efectos prácticos puede considerarse que el consumo de agua para la generación de la energía eólica es nulo.

8.1.2. Otros beneficios

Una forma de valorar los beneficios obtenidos por la utilización de energía eólica consiste en incluir los costes externos o sociales a la hora de cuantificar los costes de producción de la energía. Estos costes, no incluidos a la hora de reflejar el precio de la energía y que provocan por ello importantes desviaciones a la hora de valorar la rentabilidad de las distintas fuentes, incluirían básicamente los aspectos ambientales. La cuantificación de aspectos como las emisiones atmosféricas emitidas o el riesgo asociado a las centrales nucleares es realmente compleja. A menudo se han utilizado métodos que relacionan las emisiones con un cierto número de enfermos o muertos; este número es posteriormente transformado en un valor económico al cual debe añadirse el valor asociado al impacto producido sobre la flora, la fauna, etc.

A pesar de la complejidad que supone la aplicación de este método, este es comúnmente aceptado en la elaboración de eco balances. Debido a esta complejidad los resultados de diferentes análisis ofrecen un rango de valoración bastante amplio ya que este oscila entre los 0,01€ y los 0,1€/kWh generado. Esto significaría para la producción total del aerogenerador (la energía anual generada) un ahorro ambiental que se cuantificaría en un valor que oscilaría entre los 4 y los 40 euros anuales.

Como puede observarse, al haber previsto la energía anual generada en el km 125 de la panamericana Huacho-Lima, con vientos no muy elevados y al tratarse de un aerogenerador de baja potencia, lógicamente los ahorros ambientales existentes son muy pequeños.



8.1.3. Interacciones con el medio físico

Ocupación del Terreno

Un argumento citado frecuentemente en contra del desarrollo de la energía eólica es la gran necesidad de terreno debido a la dispersión de la fuente, en contraposición, por ejemplo, con la gran concentración de la fuente en el caso de la energía nuclear. La gran diferencia yace en el hecho de que, mientras que en la energía eólica la mayor parte del terreno usado permanece intacto, en las fuentes no renovables el terreno tiene un uso exclusivo para ese aprovechamiento y su recuperación posterior para otros usos es también difícil.

En el caso de la colocación del aerogenerador de baja potencia que nos atañe, la ocupación del terreno es ínfima y su recuperación tras la fase de desmantelamiento es total.

8.1.4. Interacciones con el medio biótico

Riesgo de la Avifauna

Los riesgos para las aves causados por los aerogeneradores son los derivados de la posibilidad de colisión con las palas o con la torre. El movimiento de las palas hace que los aerogeneradores sean más visibles para las aves que otras estructuras similares: torres eléctricas, antenas, etc.

Es evidente que debe tenerse en cuenta las rutas de migración y especiales zonas de alto número de especies sensibles o en peligro de extinción.

No obstante hay que decir, que a la par de la experiencia operativa de una gran cantidad de centrales eolieléctricas en el mundo, se han emprendido estudios sobre la mortalidad de aves al chocar contra los rotores y las estructuras de los aerogeneradores. También se ha estudiado el efecto de los aerogeneradores sobre el hábitat y costumbres de las aves. Estudios llevados a cabo en varios países sugieren que los aerogeneradores no tienen impacto significativo en la vida de las aves, al compararse con otras actividades humanas.

Las líneas de transmisión de energía eléctrica presentan una amenaza mucho mayor que los aerogeneradores. Por tanto en lo que respecta a la instalación del aerogenerador del presente proyecto, debido a la pequeña superficie ocupada por las palas y a que la línea eléctrica va conducida por el interior de la torre hasta el suelo, se puede considerar que el riesgo de la avifauna es mínimo.



Vegetación

Se considera como impacto sobre la vegetación el equivalente impacto por erosión del suelo, puesto que en la erosión queda implícita la pérdida de la vegetación. La importancia y significación de la vegetación en la identificación de los impactos ambientales radica en ser, por lo general, un elemento fundamental en la expresión de los ecosistemas. Desempeña un papel básico como asimilador de la energía solar, constituyéndose así en el productor primario, que mantiene y soporta los demás niveles tróficos. También son importantes sus relaciones con el resto de los componentes bióticos y abióticos del medio y contribuye a precisar las condiciones microclimáticas que caracterizan el hábitat de los ecosistemas.

En la estimación de los impactos sobre la vegetación es preciso considerar dos cuestiones: el valor de la vegetación presente en la zona en la que se va a colocar el aerogenerador, y la incidencia en ella de las operaciones de construcción y posterior funcionamiento.

Los impactos sobre la vegetación pueden ser directos (desaparición de la vegetación), o indirectos (interrupción de cursos fluviales, utilización de herbicidas, incendios, pastoreo). Los primeros tienen lugar preferentemente en el momento de la construcción del parque, son fáciles de prever:

- Movimientos de tierras en la preparación de los accesos al aerogenerador (en caso de ser necesarios).
- Realización del anclaje al suelo (no se necesita cimentación).

8.1.5. Interacciones con el medio humano

El impacto visual

Respecto al impacto visual, no hace falta reseñar la dificultad de evaluación del mismo, ya que si bien es verdad que cualquier estructura recortada vertical con partes móviles destaca en el paisaje y atrae la atención del observador, no es menos verdad que esta reacción es subjetiva y difícil de cuantificar, ya sea positiva o negativamente.

El impacto visual depende de la percepción de las personas. Para algunas los aerogeneradores son feos y deterioran el paisaje, mientras que para otras son agradables y representan una tecnología amigable al medio ambiente. Al igual que el problema de ruido, el impacto visual depende de la cercanía entre las poblaciones y la instalación del aerogenerador.



Asimismo, adquiere mayor o menor dimensión dependiendo de varios factores psicológicos y sociales. Por ejemplo, si la generación eoloelectrica ayuda a crear nuevas fuentes de empleo y contribuye al desarrollo regional, difícilmente los aerogeneradores pueden verse rechazados por motivos estéticos.

En encuestas realizadas en muchísimos países desarrollados, la gran mayoría de la población responde positivamente ante la implantación de sistemas oleoelectricos cercanos a su entorno.

De todas formas, con objeto de evitar, en la medida de lo posible, el efecto visual negativo se empleará un color adecuado, una posición apropiada de las instalaciones en la orografía del lugar y cuidar la distribución del aerogenerador atendiendo a la perspectiva desde las carreteras más cercanas. Los elementos característicos de una instalación eólica que producen este tipo de impacto es el propio aerogenerador, los accesos, las líneas eléctricas y los centros de transformación.

Los accesos minimizan su impacto evitando al máximo posible el movimiento de tierras necesario, recuperando inmediatamente el cubriente vegetal afectado y autorizándose el paso al personal de explotación de la instalación o trabajadores de la finca, ya que se trata de una propiedad privada.

En general, para este tipo de impacto puede indicarse que:

- La orografía de los terrenos juega un papel importante.
- La orientación respecto al observador supone criterios de tipo subjetivo.

Los ángulos de visualización y el impacto pueden establecerse en tres niveles:

1. Primer nivel: dentro de la instalación o colindante con esta, con un gran impacto.

2. Segundo nivel o intermedio: en el que la topografía suele minimizar el impacto hasta hacerlo incluso nulo.

3. Tercer nivel: a partir de un kilómetro de la instalación, en la que el impacto depende muy directamente de la dirección de visualización del observador.

Dadas las pequeñas dimensiones de territorio ocupado para la colocación del aerogenerador, el impacto visual será de tercer nivel.



El ruido

Los aspectos del proyecto susceptibles de causar ruido son los vehículos pesados durante la instalación del aerogenerador y el propio aerogenerador en su funcionamiento.

La emisión de ruido acústico puede llegar a ser un inconveniente cuando se trate de un gran número de aerogeneradores instalados cerca de lugares habitados.

El ruido de origen mecánico depende de una serie de factores que en el caso de el aerogenerador de baja potencia de imanes permanentes sólo depende del diseño del generador.

En cuanto al ruido de origen aerodinámico hay que considerar los siguientes parámetros:

- La velocidad de giro de las palas. Este factor es el más importante; un incremento del 20% de la velocidad multiplicada por tres el ruido producido.
- El material de que están construidas las palas.
- El diseño de las palas, principalmente el espacio que existe entre el cuerpo de la pala y su extremo. Cuanto más pequeño sea este espacio, menor será el ruido generado.
- La velocidad del viento y sus turbulencias. Este factor puede incrementar tanto el ruido producido por los aerogeneradores, como el ruido ambiental.
- El número de palas.

Los límites de ruido varían, tomando como límite de ruido industrial aceptable entre 40 y 60 dB. Para dar una idea del ruido equivalente a cada nivel de sonoridad, se adjunta a continuación la siguiente tabla:

Nivel de sonido	Umbral de audibilidad	Caída de hojas	Susurro	Conversación	Tráfico urbano	Concierto de rock	Avión a reacción
dB	0	10	30	60	90	120	150

Tabla 8.3. Nivel de sonoridad en función de actividades significativas.

El ruido que provoca un aerogenerador de baja potencia, entendiendo por baja potencia una potencia inferior a 1kW, es prácticamente inapreciable, ya que a bajas velocidades del viento, al girar las palas tan pequeñas a poca velocidad no producen ruido, y a velocidades entre 4 y 7 m/s y superiores, el ruido que provoca el viento en la atmósfera (debido a que choca con el suelo, árboles o cualquier obstáculo) enmascara al ruido producido por el aerogenerador.



8.2. Impacto socioeconómico regional

La instalación de este tipo de aerogeneradores en zonas pobres del planeta donde el recurso de la energía eléctrica es inviable a través de la red, tiene una notable importancia desde el punto de vista social y de las repercusiones positivas que comporta, debido tanto a la creación de puestos de trabajo directos como a los indirectos que se derivan del volumen de suministros contratados, además de la comentada contaminación evitada y del hecho fundamental de prestar un servicio que de otro modo sería imposible ofrecer.

Se trata, pues, también de una aportación importante de nuevo “know-how”, tanto en el proceso de fabricación (como es este proyecto) como en el de operación y mantenimiento, así como en la actividad en si (aprovechamiento de la energía eólica).

En el ámbito tecnológico, la construcción de un aerogenerador y una instalación eólica, abarca un importante número de sectores industriales y además con altas exigencias tecnológicas. Se requiere la participación de la industria del metal, con los subsectores de la fundición, mecanizado y acabados de superficie; industria de componentes eléctricos electrónicos; construcción con fibra de vidrio; componentes mecánicos; y mantenimiento de todos estos.

Esta tecnología obliga a usar productos con altas exigencias de alta calidad y a desarrollar productos específicos, que conllevan la creación de puestos de trabajo especializados, e incluso, para ciertos materiales o componentes, genera la oportunidad para crear nuevas empresas.

Conviene hacer mención de ciertas recomendaciones sobre otras alteraciones que generan riesgos directos o indirectos, y que pueden producir afectaciones en las distintas fases del proyecto; tales como:

- Emplear aceites lubricantes del grupo de los poliglicoles por su vida útil mucho mayor que la de los aceites minerales.
- No deben usarse pinturas que contengan plomo.

Entre los riesgos debidos al funcionamiento, los más importantes son los siguientes:

- Caída del personal de mantenimiento.
- Rotura de palas.
- Rotura de torre.

Normalmente estos riesgos afectan solamente a las zonas próximas a los aerogeneradores.



9. PRESUPUESTO

A continuación se muestra el coste económico del presente proyecto. En el presupuesto presentado se refleja el coste económico desde el punto de vista de contratar un ingeniero, así como los costes de material necesarios para la realización del contenido del proyecto, y desde otro punto de vista también se tiene en cuenta el coste económico de llevar a cabo la construcción del aerogenerador, teniendo en cuenta la compra de materiales y la mano de obra.

9.1. Coste económico del diseño del proyecto

A continuación se muestra una tabla con el coste económico detallado de la realización del proyecto por parte de los alumnos:

CONCEPTO	COSTE UNITARIO	UNIDADES	HORAS	COSTE (€)
Horas ingeniero júnior	30 €/h	2	300	18.000
Horas profesorado	40 €/h		25	1000
Papel	5 €/paquete 500 hojas	1		5
Amortización PC	62,5 €/mes	1	5 meses	312,5
Material Informático	0,6 €/CD o disket	8		4,8
Tinta impresora	40€/negra	1		40
	60€/color	1		60
Licencias Software				450
Internet	20 €/mes	2	5 meses	200
Fotocopias	0,04 €/fotocopia	50		2
Electricidad	0,085764 €/kWh		300	5,4
Teléfono	0,12 €/min	2	2 horas	28,8
Transporte	3,5 €/trayecto	32		112
COSTE TOTAL DISEÑO				20.220,5

Tabla 9.1. Coste económico de la realización del presente proyecto.

En las horas de profesorado se considera las horas dedicadas por el director del proyecto el profesor Sr. Lluís Batet y consultas puntuales con el profesor Gonçal Fernández para tratar diversos aspectos del proyecto.

Para el cálculo de la electricidad se ha considerado el uso durante 300 horas de un ordenador (200 W) y una lámpara de flexo (11 W).

En la amortización del PC se considera un portátil que costó 1500 € con una vida actual de 2 años. Como software se refleja la amortización del coste de licencia de los diversos programas utilizados en la realización del proyecto, que en este caso son Windows 2000, SolidWorks 2004 y el paquete de Office.



Los desplazamientos realizados son los correspondientes a consultas al director del proyecto, teniendo en cuenta ida y vuelta de los dos alumnos.

9.2. Coste económico de la construcción del aerogenerador

Seguidamente se muestra el presupuesto teniendo en cuenta la puesta a la práctica del proyecto especificado, es decir, el coste económico de construir un aerogenerador como el descrito en el proyecto.

Este presupuesto se descompone en el coste de los materiales para el aerogenerador, el coste de los materiales para construir los moldes y plantillas (coste considerado sólo para el primer aerogenerador), el coste de la energía consumida en los procesos, así como el coste de las horas dedicadas por los operarios que lleven a cabo la construcción del aerogenerador.

Así pues, en primer lugar se muestra el presupuesto de la adquisición de los materiales que deben adquirirse en la zona de la provincia de Barcelona para construir el aerogenerador.



MATERIALES	CANTIDAD DEMANDADA	PRECIO (€/unid.)	COSTE (€)
GENERADOR			
ENCASTAMIENTO			
Resina de poliéster con catalizador	2 botes de 250g 1 bote de 2000g	5,8€/250g 1€/2000g	32,60
Polvo de Talco	3 botes de 500g	13€/500g	39,00
Fibra de vidrio	1 m ²	2€/m ²	2,00
ACERO			
Plancha para discos	Una plancha de 1 x 2 m, espesor 6mm	46,40	46,40
Barra roscada M8	1000mm	0,495	0,495
Barra roscada M10	1000mm	0,77	0,77
Tuercas M10	44 tuercas hexagonales	0,0330	1,452
Tornillos M10	4 de M10 x 30, cabeza hexagonal	0,2	0,8
Tuercas M8	12 tuercas hexagonales	0,0162	0,19
Arandelas M10	16 arandelas planas (altura 0,5mm)	0,011	0,18
Tuercas M5	2 tuercas hexagonales	0,03	0,06
Tornillos M5	2 de M5 x 25, cabeza hexagonal	0,1	0,20
ELEMENTOS ELÉCTRICOS			
Hilo de cobre esmaltado	2671 g de diámetro 1,5mm	8,443 €/kg	22,55
Cable flexible	1 carrete 25 m, diámetro 1,5 mm	10	10,00
Bloques Magnéticos	16 imanes de Neodimio, 50x50x20mm	10,05	160,80
Alambre de Estaño	Rollo de 100 gramos, diámetro 1,5mm	4,6	4,60
Rectificadores monofásicos	2 de US1G (30A, 400V)	1	2,00
Disipador de Calor	1 de Aluminio Negro Adonizao, 250 g	6	6,00
Bloques conectores	1 regleta de 10 cm	1,55	1,55
OTROS			
Alambre de acero inoxidable	1 rollo de 10 m, diámetro 2mm	3,48	3,48
Buje (con cojinetes, tuerca, cupilla y guardapolvo)	1 buje de SEAT IBIZA	15	15,0
Eje correspondiente al buje	1 eje de buje de SEAT IBIZA	10	10,0
Cinta adhesiva	1cinta TESA blanca, 10m x 19mm	0,65	0,65
ROTOR EÓLICO			
MADERA			
Tablas	3 piezas 780x165x45mm de Pino	8,307	24,92
Plancha de madera	1 tablero de 244x122x0,8 cm	8,12	8,12
ACERO			
Tornillos M6	15 de M6x70, cabeza hexagonal	0,15	2,25
Tuercas M6	15 tuercas hexagonales	0,03	0,45
Tuercas M10	4 tuercas hexagonales	0,033	0,13
MONTURA DEL AEROGENERADOR			
ACERO			
Tubo de D.ext 60,3mm, espesor 3 mm	1 m	4,41 €/m	4,41
Ángulos 50x50 mm, espesor 6 mm	2,648 kg	0,68 €/kg	1,80
Ángulos 50x50 mm, espesor 6 mm	0,88 kg	0,68 €/kg	0,60
Anillo (60,3-15mm), espesor 6 mm	Se corta de la plancha de grosor 6 mm	0,00	0,00
Tubo de D.ext 33,4mm, espesor 3 mm	1 m	2,61 €/m	2,61
Pasamano de 60 x 10 mm	0,296 kg	1,62 €/kg	0,48
COLA DEL AEROGENERADOR			
ACERO			
Tubo de D.ext 42,2mm, espesor 3 mm	2 m	3,46 €/m	6,92
Pasamano de 30 x 8 mm	0,562 kg	0,81 €/kg	0,46
Tuercas M10	3 tuercas hexagonales	0,033	0,10
Tornillos M10	3 de M10x60, cabeza hexagonal	0,3	0,90
MADERA			
Madera contrachapada	1 tablero de 244x122x1 cm	29	29,00
MATERIAL SOLDADURA			
	1kg de varilla de D. 3mm de Acero al Níquel	6	6,00
ESTRUCTURA			
ACERO			
Tubo de D.ext. 54mm, espesor 4 mm	6 m	4,41 €/m	26,46
Cable 1x7, diámetro 6 mm	30 m	2 €/m	60,00
Tensor de ojo de 6 mm	4	5	20,00
Sujetacables y Guardacabos	12 y 4 respectivamente, para D. 6 mm	2 y 4 respect.	40,00
COSTE TOTAL			564,49

Tabla 9.2. Coste del material necesario de los elementos del aerogenerador.



A continuación se muestra de igual modo, la Tabla 9.3., con el coste económico de los diferentes materiales que es necesario adquirir para construir las plantillas y los moldes que requiere la construcción del aerogenerador.

MATERIALES PARA MOLDES Y PLANTILLAS	CANTIDAD DEMANDADA	PRECIO (€/unidad)	COSTE (€)
MADERA			
Tabla de compuesto de madera	1 tablero de 244x122x2 cm	14,152	14,152
Tabla de compuesto de madera	1 tablero de 244x122x1,5 cm	12,18	12,18
Tabla de compuesto de madera	1 tablero de 244x122x2,5 cm	18,56	18,56
Madera contrachapada	1 tablero de 244x122x1,3 cm	37,7	37,7
ACERO			
Placa 60x30x6 mm	Se corta de la plancha de grosor 6 mm	0,00	0,00
Chapa de 125x125x1mm	1 x 0,125 m, espesor 1mm	69,5 €/m ²	8,69
Tubo D.ext 17mm, espesor 1mm	1 m	3,46 €/m	3,46
Tornillos M6	2 de M6x60, cabeza hexagonal	0,45	0,9
Tornillos M10	4 de M10x70, cabeza hexagonal	0,3	1,2
Tornillos M12	1 de M12x150, cabeza hexagonal	0,54	0,54
Tuercas M6	2 tuercas M6, mariposa	0,18	0,36
Tuercas M8	4 tuercas M8 hexagonales	0,0162	0,065
Tuercas M10	4 tuercas M10 hexagonales	0,033	0,132
Tuercas M12	1 tuerca M12 hexagonal	0,75	0,75
Arandelas M6	2 arandelas planas M6	0,01	0,02
Arandelas M10	4 arandelas planas M10	0,011	0,044
Arandelas M12	1 arandela plana M12	0,02	0,02
OTROS			
Cola	Bote de Cola Blanca, 500g	4,2	4,2
Cera	Bote Cera de Patinar, 500ml	11,69	11,69
Barniz	Bote Titanlux Poliuretano, 250 ml	5,3	5,3
Agente desmoldeante	Bote DESMOLD PVA 330, 400 ml	3,1	3,1
Papel	1 cartulina blanca de 50x65 cm	2,22	2,22
Pinceles	3 del 20	1,2	3,6
Diluyente	Bote Nitro Dipistol, 250 ml	2,7	2,7
COSTE TOTAL			131,58

Tabla 9.3. Coste del material necesario de los moldes y plantillas del aerogenerador.

Para finalizar el cálculo del coste económico de la construcción del aerogenerador, hay que tener en cuenta también el coste del trabajo en el taller que incluye el consumo de energía ya calculado en la Tabla 6.3. de la página 115 (5,709 kWh) y el coste del trabajo realizado por los operarios en el taller.

Para calcular el coste del trabajo realizado por los operarios en el taller, se ha supuesto que con 5 operarios que trabajen 10 horas cada uno durante 7 días se puede realizar el trabajo. De hecho con estos datos concretos, se tiene conocimiento de que un grupo de personas ha conseguido construir aerogeneradores basados en el de Hugh Piggott.



Se ha supuesto que el coste unitario de un operario de taller es el equivalente al salario horario (€/h) que cobra un empleado en el sector del metal según la UPM (Unión Patronal Metalúrgica) y teniendo en cuenta según la UPM que se trata de operarios del grupo profesional 5 (un grupo intermedio). Estos asalariados cobran según los datos de la UPM, un salario anual de 15.786,54 € y trabajan 1752 horas al año, de donde se deduce que el salario horario correspondiente es de 9,01 €/h.

CONCEPTO	COSTE UNITARIO	CANTIDAD CONSUMIDA	COSTE (€)
Horas operario	9,01 €/h	5 Operarios 70 h/operario	3153,50
Energía procesos	0,085764 €/kWh	5,709 kWh	0,49
Luz	0,085764 €/kWh	70 h consumiendo 600 W	3,60
COSTE TOTAL TALLER			3157,59

Tabla 9.4. Coste del trabajo realizado en el taller.

Si se tiene en cuenta que el coste total del taller se puede repartir de igual modo en la construcción propia de las partes del aerogenerador como en la construcción de los moldes y plantillas, se puede afirmar que:

Coste de construcción del primer aerogenerador	3.853,66 €
Coste Materiales Aerogenerador	564,49 €
Coste Materiales Moldes y plantillas	131,58 €
Coste Total Taller	3.157,59 €
Coste de los siguientes aerogeneradores	2.143,28 €
Coste Materiales Aerogenerador	564,49 €
Coste Total Taller/2	1.578,80 €

Tabla 9.5. Coste del primer aerogenerador respecto los siguientes.

9.3. Presupuesto final

Teniendo en cuenta todos los conceptos descritos, desde el diseño del presente proyecto hasta la puesta a la práctica de la construcción del primer aerogenerador descrito en el proyecto, se obtiene el presupuesto final.

CONCEPTO	COSTE (€)
Realización PFC	20.220,50
Coste de construcción del primer aerogenerador	3.853,66
- coste materiales aerogenerador	564,49
- coste materiales moldes y plantillas	131,58
- coste total taller	3.157,59
PRESUPUESTO FINAL	24.074,16

Tabla 9.6. Presupuesto final del diseño y construcción del primer aerogenerador.





CONCLUSIONES

Se pueden extraer varias conclusiones de la realización del presente proyecto, principalmente relacionadas con la construcción del aerogenerador, la energía y dinero necesarios para la misma y también se pueden extraer conclusiones a cerca del funcionamiento del aerogenerador según el tipo de imanes de los rotores.

Por un lado la sencillez, precisión y completitud del manual de construcción del aerogenerador, y por otro lado la fácil y económica adquisición en Barcelona de los materiales necesarios para la construcción del aerogenerador, así como para la construcción de los moldes y plantillas previos, hacen que sea factible que una o varias personas con pocos conocimientos y medios de fabricación, construyan su propio aerogenerador de baja potencia con la seguridad de un buen funcionamiento y vida útil.

Respecto al coste económico de adquirir un aerogenerador de este tipo, hay que señalar que sólo un 15 % aproximadamente es debido a los materiales, y lo que dispara el precio es el coste de la mano de obra.

En el estudio mecánico se ha obtenido una simulación aproximada del comportamiento del aerogenerador en función de la velocidad del viento. De este capítulo, también se han deducido varios puntos importantes a tener en cuenta en futuros proyectos, como sería el estudio más exhaustivo del valor de la fuerza del viento que actúa sobre las palas del rotor, así como variar parámetros geométricos que permitan optimizar el comportamiento del sistema.

En el capítulo del estudio eléctrico, se ha obtenido la curva característica del aerogenerador. Aunque sea una curva hecha a partir de varias hipótesis, muestra una idea del comportamiento eléctrico del sistema. Este capítulo también ha servido para establecer que puntos deberían ser estudiados con mayor exactitud, que debido a la imposibilidad de trabajar con un aerogenerador real, no se ha podido hacer y se consideran puntos importantes, como son la relación entre el coeficiente de potencia y el parámetro lambda y la caracterización exacta del circuito eléctrico.

Desde el punto de vista energético, es evidente que la práctica totalidad del consumo energético necesario para la construcción de un aerogenerador es debido a la energía incorporada a la adquisición de los materiales, ya que los procesos de mecanizado y soldadura prácticamente no suponen consumo energético.



Con la hipótesis de colocar el aerogenerador en una localización con un viento muy moderado, se recupera la energía consumida en la construcción del primer aerogenerador, que incluye también adquirir y conformar las plantillas y los moldes, en un tiempo aproximado de un año de funcionamiento continuo. Un tiempo que se puede considerar pequeño para la vida útil de aproximadamente 20 años [8], que se espera del aerogenerador y los vientos a los que puede verse sometido en otras localizaciones que reducirían el tiempo de retorno energético en meses. Además, la construcción de los siguientes aerogeneradores se recupera en un tiempo inferior de unos 10 meses. Por tanto, se puede afirmar que el aerogenerador de imanes permanentes de Neodimio descrito en el presente proyecto, desde el punto de vista energético es totalmente sostenible.



AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente proyecto, Juan Antonio Monterrubio Montesó y Natxo de Marco Ibáñez, desea agradecer al Departamento de Física e Ingeniería Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (E.T.S.E.I.B) y, por lo tanto, a sus integrantes, la disposición mostrada para facilitar los medios necesarios que conlleva la elaboración de este estudio.

Asimismo, merecen mención especial Lluís Batet, director del proyecto, cuyo interés expuesto y asesoramiento proporcionado durante todo el estudio realizado ha sido innegable e incondicional. De igual modo se quiere agradecer la aportación de información por parte de E.S.F. (Enginyers Sense Fronteres) y de ITDG.

También hay que agradecer el interés mostrado del Sr. Hugh Piggot, considerado uno de los creadores del arte de los aerogeneradores de baja potencia, que aunque no ha estado presente físicamente, su ayuda mediante correo electrónico ha sido muy importante y merecedora de tal mención.

Finalmente se quiere agradecer la dedicación en diversas consultas realizadas al profesor Gonçal Fernández del departamento de Física.





BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- [1] AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA. *World Energy Outlook 2002*.
[<http://www.iea.org/textbase/npsum/WEO2002SUM.pdf>, Mayo 2006]
- [2] LLUÍS BATET MIRACLE. *Análisis de las perspectivas energéticas mundiales para el próximo cuarto de siglo*. Publicado en:
Energía, participación y sostenibilidad. Ed: E.Velo, J.Snej, J.Delclòs.
- [3] ELISABET MAS DE LES VALLS y LLUÍS BATET MIRACLE. “*Estudio mecánico del aerogenerador*”. No publicado.
- [4] DEPARTMENT FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT. *Energy for the Poor: Underpinning the Millennium Development Goals*.
[<http://www.dfid.gov.uk/pubs/files/energyforthe poor.pdf>, Mayo 2006]
- [5] WHO 2002 (The World Health Report 2002)
- [6] HUGH PIGGOTT-SCORAIG WIND ELECTRIC-February 2001. *PMG construction Manual*.
[http://www.itdg.org/docs/energy/pmg_manual.pdf, Noviembre 2005]
- [7] TEODORO SÁNCHEZ, SUNITH FERNANDO Y HUGH PIGGOTT. *Wind rotor blade construction*.
[http://www.itdg.org/docs/energy/blades_manual.pdf, Noviembre 2005]
- [8] SIMON DUNNETT, SMAIL KHENNAS Y HUGH PIGGOTT. *Small wind systems for battery Charging-Booklet*.
[<http://www.scoraigwind.com/download/Bookletwind.pdf>, Noviembre 2005]
- [9] HUGH PIGGOTT. *How to build a wind turbine. “The axial flux windmill plans”*. Edición Hugh Piggott, Junio 2005.
- [10] [<http://www.windpower.org/es/tour>, Febrero 2006]
- [11] MSC TEODORO SÁNCHEZ C., ING. JOSÉ E. CHIROQUE B. *Evaluación y mejoras del*



aerogenerador *ITDG modelo IT-PE-100*. ITDG-CONCYTEC-UNI, Perú, Junio 2005.

Resumen disponible en: [www.itdg.com]

[12] [hugh@scoraigwind.co.uk, dirección de correo electrónico del señor Hugh Piggott]

[13] UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. *Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales*.

[http://habitat.aq.upm.es/boletin/n20/amvaz.html, Marzo 2006]

[14] JOSÉ M^a LASHERAS. *Tecnología mecánica y metrotecnica Vol. 2 (máquinas-herramientas)*. Ed. Donostiarra.

[15] JOSÉ M^a LASHERAS. *Tecnología mecánica y metrotecnica Vol. 1 (soldadura)*. Ed. Donostiarra.

[16] [http://mecanica.unidades.edu.co/apinilla/documentos/revista2/PDF/EOLICA_EN_ALEMANIA.pdf, Abril 2006]

Bibliografía complementaria

➤ Libros:

CORTÉS M., CORRALES J., ENSEÑAT A. *Teoría General de máquinas eléctricas*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1991.

URKIA I., URKIA S. *Energía renovable práctica*. Pamplona, Editorial Pamiela, 2003, p. 77-127.

J.L.RODRÍGUEZ AMENEDO, J.C.BURGOS DÍAZ, S.ARNALTE GÓMEZ. *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Ed. Rueda S.L.

J.MATA, C.ÁLVAREZ Y T.VIDONDO. *Técnicas de expresión gráfica-rama del metal*. Ed. Bruño.

JOSÉ M^a DE JUANA. *Energías renovables para el desarrollo*. Ed. Paraninfo.

JOSÉ LUIS VALENTÍN LABARTA. *Electrotecnia batxillerat*. Ed. Donostiarra.

ORIOLO BOIX, LUIS SAINZ. FRANCISCO J.SUELVES. *Tecnología eléctrica*. Ed CEYSA.

Z.C.SOLAR. *Problemas de tecnología del torno*. Ed. EVEREST.

P.VILLADANGOS CARRIZO. *Tecnología de la madera f.p.1*.Ed. EVEREST.

REITZ, F.J.MILFORD, R.W.CHRISTY. *Fundamentos de la teoría electromagnética*. J.r.



Addison-Wesley, 1996.

R.K.WAGNESS. Campos electromagnéticos. Limusa-Grupo Noriega, 1992.

➤ Material obtenido en la red:

[<http://www.thebackshed.com>, Febrero 2006]

[<http://www.otherpower.com/>, Marzo 2006]

[<http://www.windstuffnow.com/>, Enero 2006]

[<http://windpower.jkcc.com/>, Enero 2006]

[<http://www.bricotodo.com>, Marzo 2006]

[<http://www.ima.es>, Febrero 2006]

[<http://www.emac1921.com>, Febrero 2006]

[<http://usuarios.lycos.es/cordobatuning/Fibrasresinas.htm>, Marzo 2006]

[<http://www.habitat.aq.upm.es/boletin/n20/amvaz.html>, Marzo 2006]

