



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE  
VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA  
ELECTRIFICACIÓN RURAL

MEMORIA

Lorena Arbeloa Sola

Jesús Zurita Gabasa

Pamplona, Julio 2012

## **RESUMEN**

El siguiente proyecto describe el cálculo y el diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural aprovechando la energía del viento.

El objeto de este proyecto es proporcionar toda la información necesaria para la construcción e instalación de un aerogenerador de este tipo en una comunidad boliviana, concretamente en la comunidad de Vilacollo, situada en el departamento de Oruro, en la parte oeste de Bolivia. Si dicho proyecto resulta eficiente podrían llegar a instalarse aerogeneradores de estas características en otras comunidades rurales para cubrir así las necesidades energéticas de éstas.

Este proyecto se enmarca dentro del programa de Formación Solidaria de la Universidad Pública de Navarra en colaboración con la Universidad Mayor de San Simón (UMSS) y el Centro de Información de Energías Renovables (CINER), ambos situados en la ciudad de Cochabamba (Bolivia). Por tanto, la realización de este proyecto tuvo lugar parte en Cochabamba y parte en Pamplona.

En la primera parte del proyecto se estudia la situación energética mundial, centrándose en el caso de Sudamérica y poniendo especial atención al caso de Bolivia. Además, se explica la importancia de la energía y la necesidad de ésta como medio para el cumplimiento de los Objetivos del Milenio de la ONU.

A continuación, se realiza un análisis detallado del lugar donde va a desarrollarse e instalarse el primer prototipo del aerogenerador. Así, se hace un estudio completo del recurso eólico de la zona, gracias a datos proporcionados por CINER en diferentes poblaciones cercanas que fueron tomados durante periodos de tiempo de aproximadamente un año de duración. Una vez que se ha decidido la zona más apropiada para la instalación del equipo, elegida por tener unas determinadas características de viento con las cuales el funcionamiento del aerogenerador será óptimo, se estudia detalladamente la demanda energética de la comunidad seleccionada. Con los datos de la necesidad energética calculados, se dimensiona el aerogenerador, para así poder determinar el número de equipos necesarios para cubrir dicha demanda.

Posteriormente, se realizan los cálculos necesarios y se explica el diseño del aerogenerador propuesto, así como todos sus componentes (palas, eje, generador eléctrico, sistema de transmisión, estructura de sujeción,...).

Por último, se dan unas breves pinceladas sobre la conexión a red del equipo y los elementos necesarios para esto, tales como rectificadores, baterías e inversores de corriente.

Para concluir dicho proyecto se presentan los planos del aerogenerador y su coste de fabricación.

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a toda la gente de Bolivia que me prestó ayuda en la realización del proyecto durante mi estancia en Cochabamba, en especial al equipo del CINER y muy en particular a Carlos Alberto Reza por su atención prestada.

También agradecer el apoyo recibido en la UPNA por parte de diferentes profesores.

Por último, agradezco a mi familia, amigos y compañeros de universidad por tenerlos siempre cuando los he necesitado durante estos bonitos años de la carrera.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1. ANTECEDENTES	8
1.1.1. Dificultad de acceso a la energía	
1.1.2. Situación energética en Bolivia	
1.2. JUSTIFICACIONES	14
1.2.1. Papel de la energía en el desarrollo	
1.2.2. Objetivos del Milenio de la ONU para el 2015	
1.2.3. Importancia de la energía para el Cumplimiento de los Objetivos del Milenio	
1.3. OBJETIVOS	21
1.3.1. Objetivo general	
1.3.2. Objetivos específicos	
1.4. ENERGÍA EÓLICA COMO SOLUCIÓN ALTERNATIVA	22
1.4.1. Energía eólica. Situación mundial	
1.4.2. Energía eólica. Situación latinoamericana y boliviana	
1.4.3. Beneficios de la aerogeneración	
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>28</b>
2.1. EL RECURSO EÓLICO	28
2.1.1. Aprovechamiento del viento	
2.1.2. Velocidad del viento	
2.2. MEDICIÓN DEL VIENTO	30
2.2.1. Medida de la velocidad: anemómetro	
2.2.2. Medida de la dirección: veleta	
2.2.3. Ubicación del sistema de medida	
2.2.4. Escala Beaufort	
2.2.5. Obtención de datos mediante el atlas eólico: First Look	
2.3. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL VIENTO	35
2.3.1. Variación de la velocidad del viento con la altura	
2.3.2. Variación de la velocidad del viento con la orografía del terreno	
2.3.3. Variación de la velocidad del viento con la existencia de obstáculos	
2.3.4. Variación de los parámetros de Weibull con la altura	

2.4. POTENCIA EÓLICA DISPONIBLE: POTENCIAL EÓLICO _____	41
2.4.1.Variación del potencial eólico con la altura	
2.5. DESCRIPCIÓN DE LAS MÁQUINAS EÓLICAS DE BAJA POTENCIA _____	43
2.5.1.Teorema de Betz	
2.5.2.Clasificación de las máquinas eólicas	
2.6. CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN ENERGÍA ELÉCTRICA _____	53
<b>3. EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO _____</b>	<b>55</b>
3.1. INTRODUCCIÓN _____	55
3.2. SELECCIÓN DE LAS COMUNIDADES CANDIDATAS PARA REALIZAR MEDICIONES _____	57
3.3. INSTALACIÓN DE ANEMÓMETROS Y TOMA DE MEDIDAS _____	58
3.4. RECOPIACIÓN DE DATOS _____	60
3.5. EVALUACIÓN DE LOS DATOS: GRÁFICOS Y DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA _____	61
3.5.1.Perfiles diarios y distribución Weibull	
<b>4. INFORMACIÓN SOBRE LA ZONA DEL PROYECTO _____</b>	<b>69</b>
4.1. INTRODUCCIÓN _____	69
4.2. UBICACIÓN DE LA POBLACIÓN DE VILACOLLO _____	69
4.3. CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN _____	70
4.3.1.Características de la población actual	
4.3.2.Características de la población futura	
4.4. ESTUDIO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA _____	72
4.4.1.Categoría residencial	
4.4.2.Categoría general	
<b>5. DISEÑO DEL AEROGENERADOR SAVONIUS DE 100W _____</b>	<b>84</b>
5.1. INTRODUCCIÓN _____	84
5.2. ¿POR QUÉ DISEÑAR UN AEROGENERADOR SAVONIUS? _____	85

5.3. CONDICIONES EXTERNAS_____	86
5.3.1. Condiciones ambientales	
5.3.2. Parámetros de posicionamiento del aerogenerador en el lugar de instalación	
5.4. CONDICIONES INTERNAS_____	87
5.4.1. Diseño del rotor	
5.4.2. Diseño del eje principal	
5.4.3. Diseño del sistema de transmisión	
5.4.4. Diseño del generador eléctrico	
5.4.5. Diseño de la estructura de sujeción	
5.4.6. Facilidad en el remplazo de los componentes	
5.4.7. Peso del aerogenerador	
<b>6. INGENIERÍA DEL PROYECTO_____</b>	<b>95</b>
6.1. INTRODUCCIÓN_____	95
6.2. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL ROTOR DEL AEROGENERADOR_____	95
6.2.1. Determinación de la velocidad de diseño	
6.2.2. Determinación de la forma de las palas	
6.2.3. Determinación de las dimensiones del rotor	
6.2.4. Determinación de la velocidad de rotación	
6.2.5. Estudio de las palas del aerogenerador	
6.2.6. Estudio del eje principal	
6.3. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL GENERADOR ELÉCTRICO_____	109
6.3.1. Determinación del número de polos	
6.3.2. Determinación del número de bobinas	
6.3.3. Selección de los imanes	
6.3.4. Selección del conductor	
6.3.5. Determinación del número de espiras por bobina	
6.3.6. Cálculo de la longitud del bobinado	
6.3.7. Cálculo del voltaje final	
6.4. CÁLCULO DE LOS RODAMIENTOS Y DE LA ESTRUCTURA DE SUJECIÓN_____	115
<b>7. INSTALACIÓN, MONTAJE, MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD_____</b>	<b>119</b>
7.1. INTRODUCCIÓN_____	119
7.2. INSTALACIÓN Y MONTAJE_____	119

7.3. MANTENIMIENTO DEL AEROGENERADOR	120
7.3.1. Mantenimiento preventivo	
7.3.2. Mantenimiento correctivo	
7.4. SEGURIDAD EN EL AEROGENERADOR	121
<b>8. COSTES DE FABRICACIÓN</b>	<b>122</b>
8.1. COSTE MATERIALES	122
8.1.1. Rotor	
8.1.2. Generador eléctrico	
8.1.3. Sistema de transmisión	
8.1.4. Coste de la estructura de sujeción	
8.1.5. Coste material total	
8.2. COSTE TALLER	126
8.3. COSTE HERRAMIENTAS	126
8.4. COSTE TOTAL	127
<b>9. CONCLUSIONES</b>	<b>128</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>129</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>131</b>
<b>ANEXO 1: CÁLCULO DEL NÚMERO NECESARIO DE AEROGENERADORES</b>	
<b>A INSTALAR PARA CUBRIR LA DEMANDA ENERGÉTICA</b>	132
<b>ANEXO 2: ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN LAS PALAS MEDIANTE</b>	
<b>ELEMENTOS FINITOS</b>	135
<b>ANEXO 3: SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS</b>	145
<b>ANEXO 4: CÁLCULO DEL PESO DEL AEROGENERADOR</b>	150
<b>ANEXO 5: COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO</b>	
<b>Y CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA</b>	153

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

#### 1.1.1 Dificultad de Acceso a la Energía

La energía ha sido siempre un elemento muy importante para el desarrollo de la humanidad. Inicialmente el ser humano utilizaba formas de energía convencionales como la leña o la biomasa para generar fuego y así poder cocer alimentos, ahuyentar animales y mantener el calor. Con el tiempo las fuentes de energía evolucionaron y a partir de procesos de conversión se pudo generar vapor, energía mecánica y electricidad. Las fuentes de energía más utilizadas a lo largo de la historia han sido el carbón, el petróleo, la energía nuclear o el gas natural. En la actualidad, las energías renovables (solar, hidráulica, eólica,...) tienen también un papel muy importante.

Sin embargo, a pesar de la evolución de las distintas fuentes de energía, actualmente se estima que más de dos mil millones de personas en países en vías de desarrollo, más concretamente en las zonas rurales, sólo cuentan con fuentes de energía tradicional como leña, carbón vegetal o estiércol para satisfacer sus necesidades energéticas. Además, estas personas tampoco tienen acceso a los procesos de conversión de energía, por lo que no pueden acceder a servicios como la iluminación, la refrigeración, el bombeo de agua o el transporte, todos ellos derivados de la electricidad.

Zona	Año 2004	Año 2015	Año 2030
África Sub Sahariana	575	627	720
Norte de África	4	5	5
India	740	777	782
China	480	453	394
Indonesia	156	171	180
Resto de Asia	489	521	561
Brasil	23	26	27
Resto de Latinoamérica	60	60	58
<b>Total</b>	<b>2528</b>	<b>2640</b>	<b>2727</b>

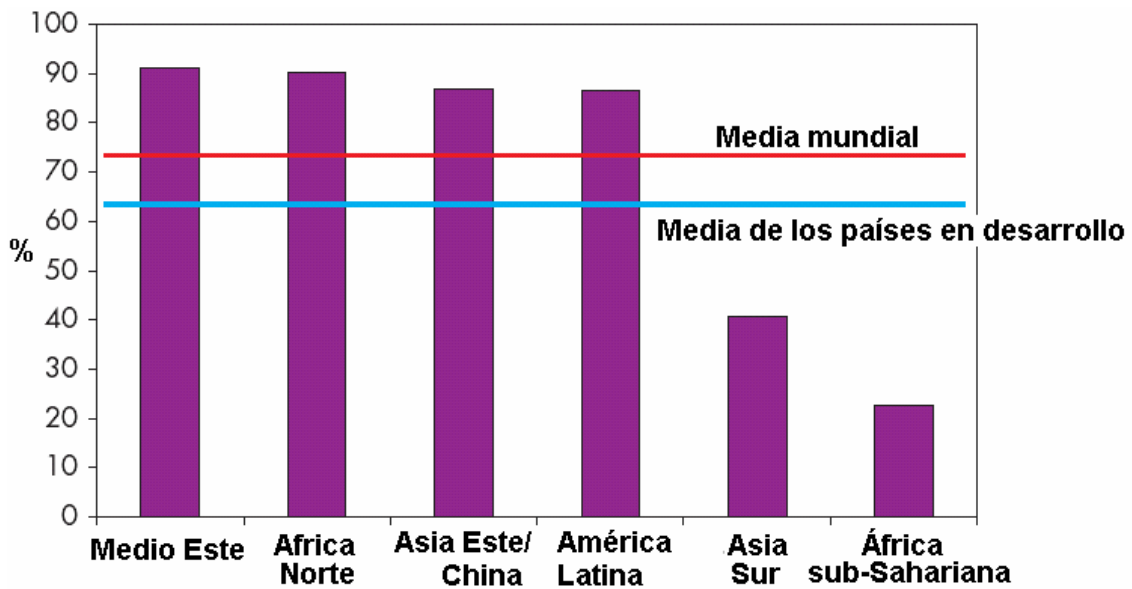
*Tabla 1.1: Millones de personas dependientes de la biomasa. Fuente: Agencia Internacional de la energía (IEA)*

El Banco Mundial estima que más de 1600 millones de personas no tienen acceso a la electricidad, esto es más del 20% de la población mundial. Además, para conseguir un servicio eléctrico universal sería necesaria una inversión de 22.000 millones de euros al año durante 30 años. Sin embargo, la cifra de las personas sin acceso a la electricidad ha bajado, ya que en el año 1970 la estimación era de 1900 millones y en el año 1990 era de 2000 millones.



Si se analiza por regiones, 509 millones de los no electrificados estarían en África Sub-Sahariana, 28 millones en el Sahara, 18 millones en China, 223 millones en el sur de Asia, 800 millones en la India y 56 millones en Sudamérica.

Esto contrasta con el nivel de electrificación que tienen los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), ya que está por encima del 99%.



Gráfica 1.1: Porcentaje de electrificación mundial. Fuente: Agencia Internacional de la Energía (IEA)

Si se distingue entre zonas urbanas y rurales las diferencias todavía son más grandes. Mientras que la electrificación se ha mantenido con la urbanización, siendo la población urbana sin electrificar de aproximadamente 250 millones de personas, en las zonas rurales el nivel de electrificación es mucho menor.

Zona	Urbana	Rural	Total
Norte de África	99,3	79,9	90,3
África Sub Sahariana	51,3	7,5	22,6
África	63,1	16,9	34,3
Sud Asia	68,2	30,1	40,8
América Latina	98	51,5	86,6
Asia Oriental	98,5	81,0	86,9
Oriente Medio	98,5	76,6	91,1
<b>Países en desarrollo</b>	<b>85,6</b>	<b>51,1</b>	<b>64,2</b>
<b>Mundo</b>	<b>91,2</b>	<b>56,9</b>	<b>72,8</b>

Tabla 1.2: Porcentaje de electrificación urbana y rural por regiones. Fuente: ingeniería Sin Fronteras (ISF)



*Imagen 1.1: Acceso a la electricidad. Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)*

### 1.1.2 Situación energética en Bolivia

#### *Nivel de electrificación*

Bolivia es un país en el que la diferencia existente entre producción de energía y demanda de ésta es mínima. Por ello, es necesario buscar fuentes de energía alternativas para producir una mayor cantidad de energía y que de esta forma exista un margen entre producción y demanda. Así, también se conseguiría hacer llegar la electricidad a determinadas zonas rurales, ya que aunque la cobertura eléctrica en 2007 en Bolivia era del 71%, el 89% correspondía al ámbito urbano, mientras que en el ámbito rural la electrificación era únicamente del 39%.

A pesar de los problemas energéticos existentes, Bolivia es uno de los países más ricos en gas natural. Sin embargo, debido a la falta de capacidad que hay para producir energía a partir de este combustible se opta por la venta del gas y la obtención de energía a partir de otros recursos, pues esto resulta más rentable económicamente hablando. Además de esto, Bolivia también tiene mucha importancia en cuanto a la energía solar, ya que es el país con más radiación solar que existe en el mundo. En los últimos 10 años se han instalados 20000 sistemas fotovoltaicos gracias a la ayuda de microcréditos. Sin embargo, la alta inversión inicial necesaria sigue siendo una de las barreras que hace que esta forma de energía se esté desarrollando de forma lenta en el país, a pesar de que vaya a ser un punto clave en el futuro energético boliviano.

Por todo ello y debido a que la red eléctrica en Bolivia no abarca todas las poblaciones del país, 3 millones de la población boliviana no tiene acceso a la electricidad y 4 millones utilizan la biomasa como principal fuente de energía para cocinar, calentar e iluminar.

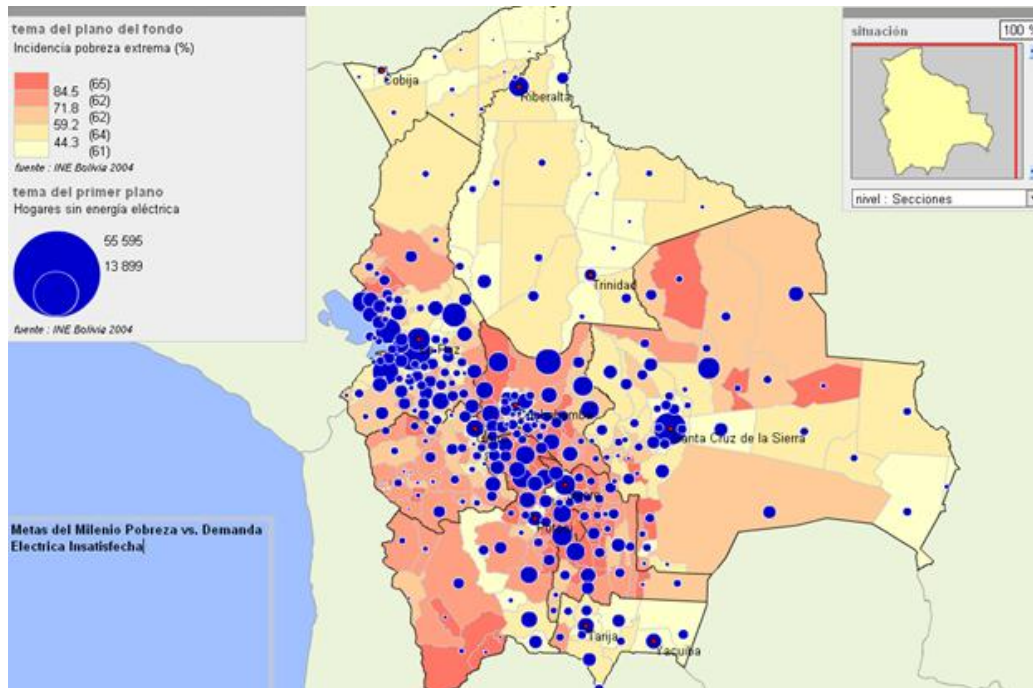


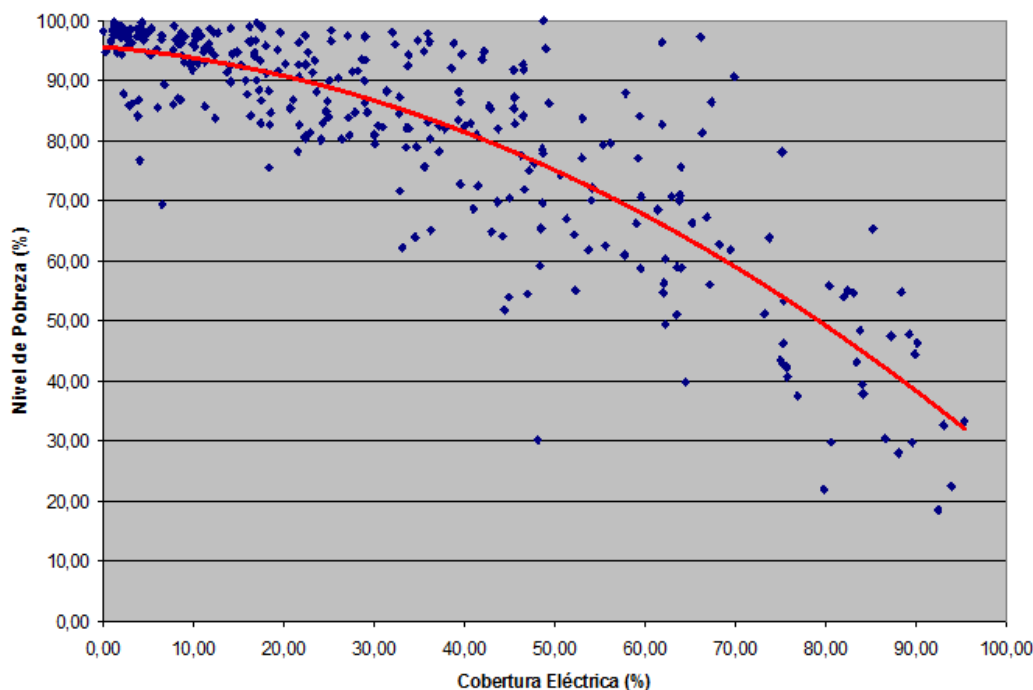
Imagen 1.2: Población sin electrificar en Bolivia. Fuente: Energías renovables y derecho de acceso a la energía. Miguel Fernández

Departamento	Hogares	Con electricidad	%
Chuquisaca	70.601	15.232	21,6
La Paz	246.908	87.149	35,3
Cochabamba	162.643	67.558	41,5
Oruro	50.869	14.917	29,3
Potosí	129.458	30.105	23,3
Tarija	32.824	14.312	43,6
Santa Cruz	102.202	35.958	35,2
Beni	22.020	4.619	21,0
Pando	6.455	1.741	27,0
<b>Bolivia</b>	<b>823.981</b>	<b>271.591</b>	<b>33,0</b>

Tabla 1.3: Cobertura del servicio eléctrico rural en el 2006. Fuente: Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas de Bolivia (VMEEA)

El acceso a la energía está totalmente relacionado con la pobreza. Las personas que no tienen acceso a ésta suelen ser familias rurales pobres que viven en comunidades pequeñas y dispersas con pocas posibilidades. Además, éstos pagan más por menos unidades de energía, siendo ésta además de menor calidad (el 11% de la electricidad que consumen representa el 78% de sus gastos).

**Municipios de Bolivia: Cobertura Eléctrica Vs. Nivel de Pobreza**



Gráfica 1.2: Relación entre nivel de pobreza y cobertura eléctrica. Fuente: Energías renovables y derecho de acceso a la energía. Miguel Fernández

El principal problema en Bolivia es que las comunidades rurales se encuentran cada vez más alejadas, tanto entre sí como del núcleo urbano. Por ello, aunque las ciudades cuenten con electricidad, llevar ésta a dichas comunidades es muy difícil y costoso, y se acerca al límite técnico y económico del país. Por todo ello, hay una gran diferencia entre el nivel de electrificación urbano y el rural.

Fuente	Urbana	Rural
Biomasa	0,27	5,01
Diesel	0,15	0,215
GLP (gas licuado de petróleo)	1,49	0,12
Electricidad	1,38	0,016
<b>Total BEP/año</b>	<b>3,29</b>	<b>5,361</b>

Tabla 1.4: Patrones del consumo familiar urbano-rural (BEP/año). Fuente: Energías renovables y derecho de acceso a la energía. Miguel Fernández

\*\*BEP: Barril Equivalente de Petróleo (unidad de energía equivalente a la energía liberada durante la quema de un barril de petróleo crudo de aproximadamente 160 litros).

Además, dentro de las comunidades rurales, conforme más pequeñas son éstas, menor es el nivel de electrificación.

Fuente	Comunidades con menos de 60 viviendas	Comunidades con menos de 120 viviendas
Electricidad	12,7%	17,2%
Biomasa	84,1%	81%

Tabla 1.5: Nivel de electrificación de las comunidades en función de su tamaño. Fuente: Energías renovables y derecho de acceso a la energía. Miguel Fernández

Las principales diferencias entre la electrificación urbana y rural son las fuentes de suministro, la seguridad en el abastecimiento y la eficiencia de las tecnologías, así como los costos de la energía, ya que las tarifas eléctricas dependen de si los sistemas son aislados o interconectados.

#### *Sistema eléctrico boliviano*

En Bolivia el flujo energético se encuentra organizado de la siguiente manera. Por un lado, está el Sistema Interconectado Nacional (SIN) que suministran energía eléctrica a las ciudades más grandes del país. En diciembre del 2004 la potencia instalada de este sistema era de 1449.8MW, según datos oficiales del Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas en Bolivia (VMEEAT). Por otro lado, se encuentran los Sistemas Aislados Menores, que cuentan con una capacidad menor a 1000kW y que suministran energía eléctrica a las ciudades más pequeñas del país. También se cuenta con los autoproveedores que en su mayoría son empresas mineras que generan electricidad para su propio consumo. Por último, se encuentran los pequeños sistemas eléctricos con fuentes renovables, ya sean sistemas fotovoltaicos, mini-centrales hidroeléctricas o aerogeneradores, los cuales sirven especialmente en la electrificación rural de comunidades aisladas.

De esta forma y como ya se ha mencionado, el hecho de que las comunidades rurales se encuentren cada vez más alejadas unas de otras y del núcleo urbano, hace que la posibilidad de extender la red eléctrica para cubrir las necesidades de estas poblaciones no resulte rentable, ya que el consumo de éstas sería bajo y las obras a realizar costosas. Por ello, la utilización de energías renovables es una buena opción para la electrificación rural. Ésta se puede llevar a cabo a través de sistemas aislados o autónomos (sin conexión a red) o a través de la puesta en marcha de mini-redes eléctricas alimentadas por energías renovables o en combinación de fuentes de energía convencionales (GLP o diesel).

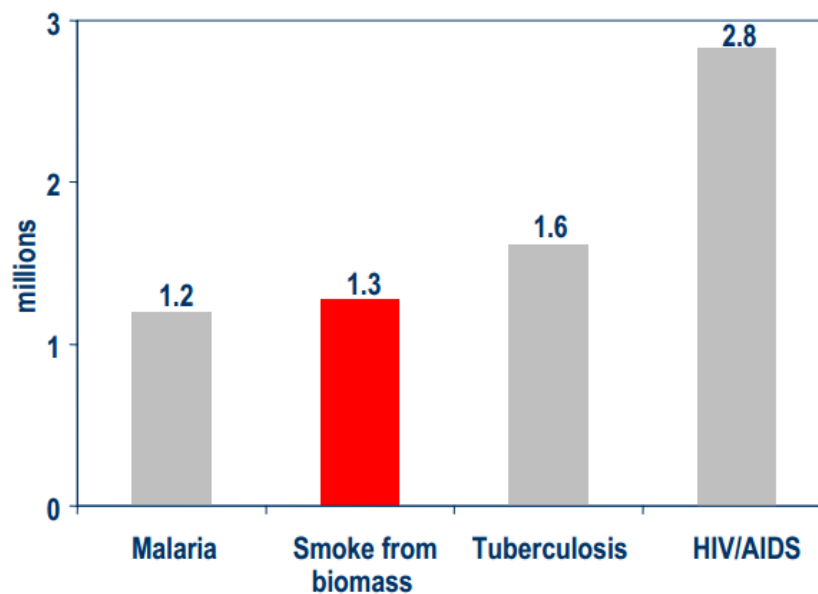
Toda esta tecnología renovable presenta una serie de características importantes: adaptación a diferentes y difíciles zonas geográficas, optimización de los recursos naturales, fácil instalación y mantenimiento, así como bajos costes de ambos, respetuosa con el medio ambiente,...

Así, en Bolivia los sistemas que más se han implementado para la obtención de electricidad han sido aerogeneradores y turbinas de baja potencia, capaces de cubrir las necesidades energéticas básicas de las comunidades rurales.

## 1.2 JUSTIFICACIONES

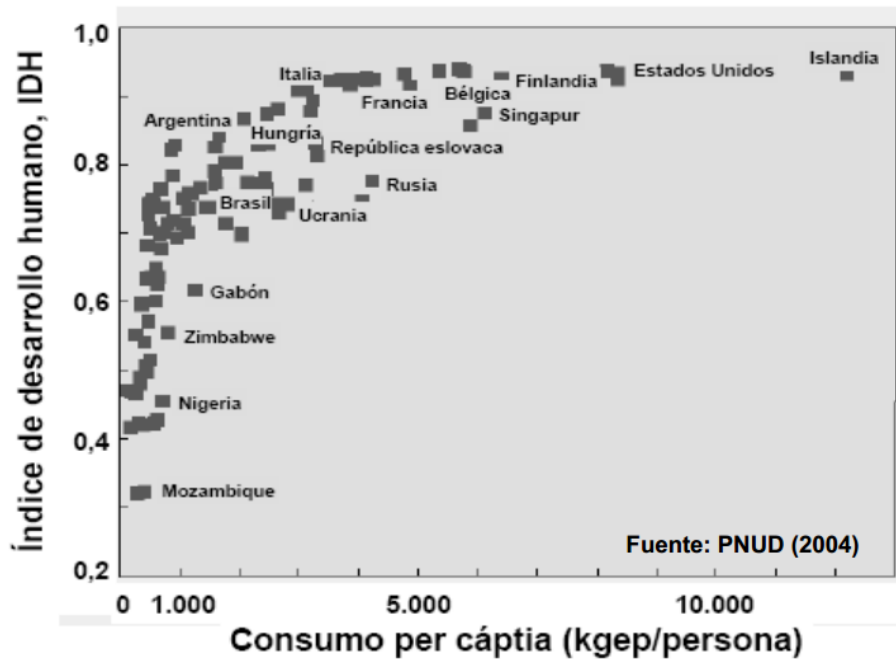
### 1.2.1 Papel de la energía en el desarrollo

Desde hace muchos años, se ha visto como hay una importante relación entre el acceso y uso de las formas modernas de energía y el desarrollo humano. Así, se ha comprobado que una de las consecuencias de la situación actual sobre la falta de acceso a la energía será la imposibilidad de cumplir los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), es decir, sin acceso a la energía será imposible conseguir reducir la pobreza extrema del planeta a la mitad para el año 2015. Todo esto es debido a que sin acceso a formas de energía moderna no es posible conseguir avances en salud, educación, acceso a agua, vivienda, temas de género,... Así, se ha investigado por ejemplo que aunque las muertes por sida, malaria y tuberculosis van a ir disminuyendo, el número de muertes que habrá como consecuencia de inhalación de humos en las viviendas será mayor que las muertes provocadas por estas tres enfermedades juntas.

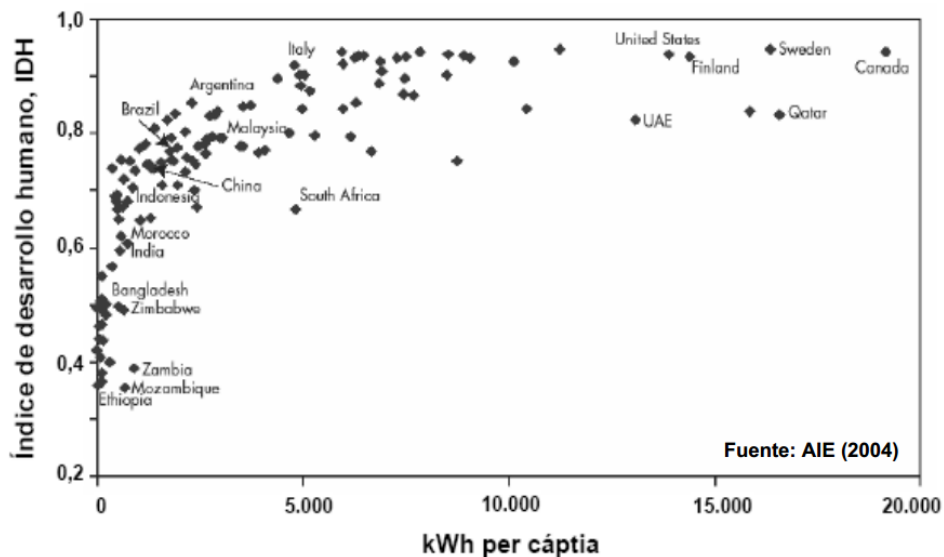


Gráfica 1.3: Comparación de millones de muertes debidas a diversas enfermedades y a la inhalación de humo en biomasa. Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS)

De esta forma, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha elaborado el Índice de Desarrollo Humano (IDH). Éste se trata de una medida de desarrollo humano que tiene en cuenta la esperanza de vida al nacer, la renta per cápita y la tasa de alfabetización combinada con la tasa de matriculación. El PNUD junto con la Agencia Internacional de Energía (AIE), han puesto de manifiesto la estrecha relación que hay entre el IDH y el consumo energético.



Gráfica 1.4: Relación entre IDH y consumo de energía primaria por persona/año (en Kgs equivalentes de petróleo). Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)



Gráfica 1.5: Relación entre IDH y consumo de electricidad por persona/año (en Kwh). Fuente: Agencia Internacional de la Energía (AIE)

Hay un punto donde consumir más energía no está relacionado a una mayor calidad de vida. El punto se encuentra en unos 4000Kwh. Por tanto, en el primer tramo (hasta los 2000kWh) un aumento de 100 o 200 kWh, permite una subida en el Índice de Desarrollo casi del doble. Por tanto, habría que centrarse en este tramo, porque es donde con un aumento pequeño de energía se puede conseguir un gran aumento en cuanto a desarrollo humano.



Para conseguir salir de la pobreza y poder generar ingresos con la energía, se debería poder cubrir las necesidades humanas básicas, es decir, tener electricidad para iluminación, comunicación y servicios comunitarios (50-100 Kwh/año), así como disponer de tecnologías y combustibles modernos para poder cocinar y calentar. Además, también se debería contar con energía para aumentar la productividad (bombeo de agua y mecanización) y disponer de combustible tanto para el transporte como para poder comercializar productos agrícolas.

Para conseguir estos objetivos es necesario llevar a cabo una política energética en la que se planifique correctamente la selección de la tecnología más adecuada en cada caso, así como la elaboración de planes fiables de electrificación rural. En este aspecto, y como ya se ha comentado, las energías renovables van a tener un papel muy importante.

### 1.2.2 Objetivos del Milenio de la ONU para el 2015

#### ***Objetivo 1. Erradicar la pobreza extrema y el hambre***

Meta: Reducir a la mitad, entre 1990 y 2015, el porcentaje de personas cuyos ingresos sean inferiores a 1 dólar por día.

Meta: Alcanzar empleo pleno y productivo y trabajo decente para todos, incluyendo mujeres y jóvenes.

Meta: Reducir a la mitad, entre 1990 y 2015, el porcentaje de personas que padecen hambre.

#### ***Objetivo 2. Lograr la enseñanza primaria universal***

Meta: Asegurar que, para el año 2015, los niños y niñas de todo el mundo puedan terminar un ciclo completo de enseñanza primaria.

#### ***Objetivo 3. Promover la igualdad de género y el empoderamiento de la mujer***

Meta: Eliminar las desigualdades entre los sexos en la enseñanza primaria y secundaria, preferiblemente para el año 2005, y en todos los niveles de la enseñanza para el año 2015.



**Objetivo 4. Reducir la mortalidad de los niños menores de 5 años**

Meta: Reducir en dos terceras partes, entre 1990 y 2015, la mortalidad de los niños menores de 5 años.

**Objetivo 5. Mejorar la salud materna**

Meta: Reducir, entre 1990 y 2015, la mortalidad materna en tres cuartas partes.

Meta: Lograr, para el año 2015, el acceso universal a la atención de la salud reproductiva.

**Objetivo 6. Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades**

Meta: Haber detenido y comenzado a reducir, para el año 2015, la propagación del VIH/SIDA.

Meta: Lograr, para el año 2010, el acceso universal al tratamiento del VIH/SIDA de todas las personas que lo necesiten.

Meta: Haber detenido y comenzado a reducir, para el año 2015, la incidencia del paludismo y otras enfermedades graves.

**Objetivo 7. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente**

Meta: Incorporar los principios del desarrollo sostenible en las políticas y los programas nacionales e invertir la pérdida de recursos del medio ambiente.

Meta: Reducir la pérdida de biodiversidad, alcanzando, para el año 2010, una reducción significativa de la tasa de pérdida.

Meta: Reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios de saneamiento básicos.

Meta: Haber mejorado considerablemente, para el año 2020, la vida de por lo menos 100 millones de habitantes de tugurios.

**Objetivo 8. Fomentar una alianza mundial para el desarrollo**

Meta: Atender las necesidades especiales de los países menos adelantados, los países en desarrollo sin litoral y los pequeños Estados insulares en desarrollo.

Meta: Desarrollar aún más un sistema comercial y financiero abierto, basado en normas, previsible y no discriminatorio.

Meta: Abordar en todas sus dimensiones los problemas de la deuda de los países en vías de desarrollo.

Meta: En cooperación con el sector privado, dar acceso a los beneficios de las nuevas tecnologías, en particular los de las tecnologías de la información y las comunicaciones.

### 1.2.3 Importancia de la energía para el cumplimiento de los Objetivos del Milenio

El acceso a la electricidad y a las energías modernas no se menciona directamente como uno de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), ya que la energía en sí no es un derecho, no es un fin, sino que se trata de un medio para poder conseguir otros objetivos.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, las poblaciones más pobres de los países en vías de desarrollo utilizan en su mayoría biomasa tradicional tanto para la cocción de alimentos como para la iluminación. Como los dispositivos que utilizan son bastante ineficientes, estos combustibles resultan ser una amenaza tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Por ello, la Organización Mundial de la Salud (OMS) calcula que para cumplir el Objetivo de Desarrollo del Milenio de reducir a la mitad la extrema pobreza en todo el mundo antes del 2015, 500 millones de personas más deberán tener acceso a la electricidad y 700 millones tendrán que haber abandonado el uso de la biomasa insostenible.

A continuación, se muestra la relación que hay entre el cumplimiento de los objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y el acceso a la energía.

#### ***Objetivo 1. Erradicar la pobreza extrema y el hambre***

Se han llevado a cabo estudios en comunidades que muestran que los costos asociados a la satisfacción de las necesidades energéticas de las familias son mucho mayores si se utilizan recursos energéticos tradicionales. Esto es debido a la menor eficiencia del proceso de la biomasa, así como a la necesidad de las familias de utilizar parte de sus ingresos para obtener bienes energéticos tradicionales como leña u otros recursos relacionados con la biomasa.

Por tanto, el uso de recursos energéticos modernos es un paso para la reducción de la pobreza, ya que permite destinar una menor cantidad de los ingresos al tema energético. Además, con una mayor eficiencia de los equipos se puede incrementar la productividad agrícola con el consiguiente incremento de los ingresos familiares.

En lo que se refiere a la salud humana, el uso de fuentes tradicionales como velas, leña o keroseno, comúnmente utilizadas en las zonas rurales, resulta muy dañino debido a las emisiones que éstas producen. Y aunque actualmente utilicen sistemas de captación de emisiones, éstos no resultan eficientes al 100%, por lo que aunque de forma más reducida, el peligro y daño siguen existiendo.

### ***Objetivo 2. Lograr la enseñanza primaria universal***

En primer lugar, el uso de recursos tradicionales de energía, obliga en muchos casos a que los niños desde temprana edad, ayuden a sus padres en la recolección de leña,... reduciendo de esta forma las horas de asistencia al colegio por parte de los menores.

Por otro lado, si se utilizara energía moderna como la electricidad, ésta permitiría el aprendizaje con más recursos como televisión, videos, ordenadores,... reduciendo de esta forma las grandes diferencias existentes entre los colegios rurales y los urbanos.

Además, la electricidad permitiría también alargar las horas de aprendizaje, promoviendo también el aprendizaje de adultos, así como el tener un mayor acceso a la tecnología de la información, con la importancia que conlleva esto para la educación.

Por último, la electricidad sería importante en cuanto al acceso de los maestros y profesores a las zonas rurales, ya que tendrían más facilidades de vivir allí o de trasladarse de forma más rápida y cómoda.

### ***Objetivo 3. Promover la igualdad de género y la autonomía de la mujer***

Como ya se ha comentado, la recolección de leña es una acción en la que participan todos los miembros de la familia, aunque hay que señalar que la mayor parte del tiempo son mujeres y niñas las que llevan a cabo esta labor. Por tanto, el uso de energía moderna reduciría la cantidad de leña necesaria, y con ello, las horas que dedican mujeres y niñas a este trabajo.

Además de esto, hay otras actividades que normalmente son responsabilidad de las mujeres y niñas como la recolección de agua. Con la existencia de electricidad se podrían diseñar sistemas de bombeo de agua lo cual facilitara su extracción, recolección y transporte.

Por último, el mayor acceso a las tecnologías de la información que se conseguiría gracias a la energía moderna, también serviría para promocionar de forma positiva la igualdad de género, permitiendo así que tanto mujeres como niñas tuvieran un mejor acceso a la educación, la salud,...

***Objetivos 4, 5 y 6. Reducir la mortalidad de los niños menores de 5 años, mejorar la salud materna y combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades***

Teniendo acceso a la electricidad se mejorarían las infraestructuras de los centros de salud, ya que se tendría iluminación, refrigeración, sería posible conservar vacunas, dar servicio después del atardecer (importante sobretodo en casos de accidente o partos).

Además, también hay una enorme relación entre salud y educación, ya que en familias cuya madre no terminó la educación primaria se dan más casos de mortalidad y enfermedades infantiles.

En cuanto al combate contra enfermedades como podría ser el SIDA, en estas poblaciones tan vulnerables son necesarias campañas educativas para así poder prevenir y tratar a los más afectados. Estas campañas podrían llevarse a cabo por radio y televisión, si se dispondría de electricidad.

Otro aspecto importante para reducir las enfermedades y muertes es el consumo de agua potable. Así, mediante un mejor acceso a los servicios de agua y sanidad existirían métodos más eficientes para hervir y desinfectar el agua.

Como también se comentó en el tema de la educación, si hay acceso a la electricidad es más fácil que médicos puedan vivir en las propias comunidades rurales o puedan llegar a ellas mediante algún tipo de transporte, sin que tengan que caminar largas distancias.

Por último, como ya se ha comentado con anterioridad también, una de las primeras causas de muerte de mujeres y niñas en los lugares más pobres según la Organización Mundial de la Salud (OMS) es la muerte por inhalación de humos. Como consecuencia del uso de leña y combustibles fósiles para cocinar, teniendo en cuenta que no hay una combustión completa del combustible y que no existe una ventilación adecuada mediante chimeneas, se estima que anualmente mueren en el mundo 2,5 millones de personas como consecuencia de intoxicaciones relacionadas con el uso de estos combustibles. Por ello, el uso de estufas mejoradas reduciría en gran medida el número de casos de enfermedades respiratorias.

***Objetivo 7. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente***

El uso no sostenible de la biomasa produce deforestación, reducción de la cobertura vegetal, degradación de suelos,... es decir, son efectos ambientales muy negativos que en algunos casos resultan irreversibles. Además, la producción y uso de la energía está muy ligado al cambio climático, cuyos impactos normalmente a largo plazo afectan a los países que se encuentran en desarrollo (inundaciones, sequías, deslizamientos,...)

Por tanto, el tema energético es muy importante en cuanto a como se adaptarán los países al cambio climático. Por ello, la utilización de combustibles limpios y energías renovables garantizarán la sostenibilidad del medio ambiente.

### ***Objetivo 8. Establecer una alianza mundial para el desarrollo***

Para poder lograr los ODM es necesaria una cooperación internacional creando asociaciones entre sectores y regiones. Como ya se ha visto, la energía es un tema intersectorial, por lo que será necesario que los países participen incluyendo el tema energético.

Así, la planificación energética entre distintas asociaciones debe asegurar que realmente las poblaciones que lo necesiten puedan tener acceso a la energía. Además, estas asociaciones también servirán para compartir información, experiencias,... y así poder crear una red de conocimiento que sirva no sólo como modelo de trabajo, sino también para concienciación de la población mundial.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

Dicho trabajo tiene por objeto el diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius capaz de suministrar una potencia de 100W para electrificación de comunidades rurales en la parte oeste de Bolivia, más concretamente en el departamento de Oruro, siendo el coste de éste bajo y teniendo una sencilla fabricación y mantenimiento.

Mediante este proyecto se quiere proporcionar toda la información necesaria para la construcción e instalación de un prototipo de dicho aerogenerador en una comunidad de prueba. De esta forma, si el sistema resulta eficiente podrá ser instalado en diferentes comunidades rurales, abasteciendo así sus necesidades de electricidad.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Estudio de la situación energética, tanto mundial como sudamericana, centrándonos en el caso de Bolivia.
- Explicación del recurso eólico y su aprovechamiento para la producción de energía.
- Evaluación del recurso eólico en diferentes zonas propuestas para la realización del proyecto.
- Descripción de la metodología seguida para la elección del lugar.
- Estudio sobre la demanda energética de la población elegida.
- Diseño y cálculo de todos los componentes del aerogenerador Savonius intentando que tanto su fabricación como su montaje sean sencillos.

- Descripción del mantenimiento del equipo.
- Establecer los costos de fabricación del equipo.
- Estudio estructural por medio de elementos finitos.
- Descripción de los equipos complementarios de almacenamiento de energía.

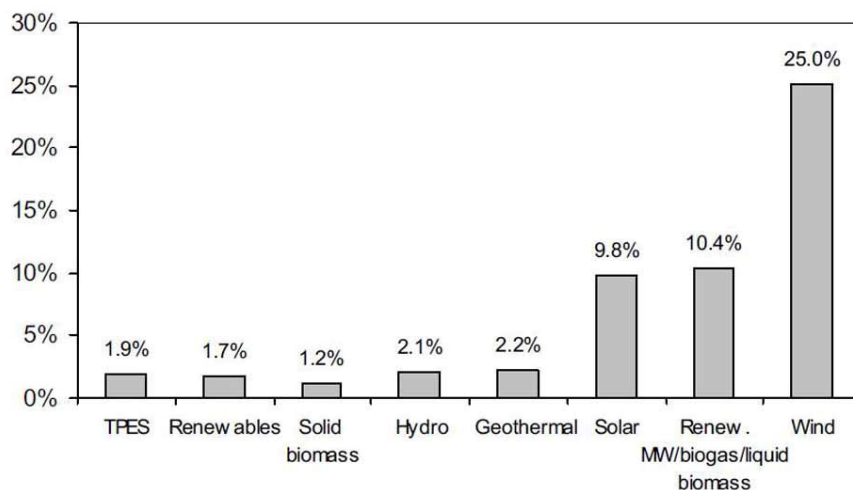
## 1.4 ENERGÍA EÓLICA COMO SOLUCIÓN ALTERNATIVA

### 1.4.1 Energía eólica. Situación mundial

La demanda energética mundial se encuentra en un constante crecimiento, siendo además éste cada vez mayor. Debido a esto, es necesaria la investigación y la instalación de sistemas de generación de energía alternativos, así como de infraestructura de red, ya que las reservas de las fuentes de energía convencionales como el carbón o el petróleo se están agotando y como consecuencia su precio está aumentando considerablemente. En 2007, el suministro total de energía primaria mundial fue de 12.026 millones de Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP), de las cuales el 12,4%, es decir 1492 millones de TEP, fueron producidas a partir de fuentes de energía renovables.

Dentro de los diferentes tipos de renovables, la biomasa sólida es la mayor fuente, ya que representa el 73% del suministro mundial de las energías renovables. Le sigue la hidroeléctrica con un 17,7% de suministro. La geotérmica representa el 3,3% y por último, se encuentran la solar, la eólica,... que representan el 1,6% del suministro mundial.

Aunque según estos datos parezca que la eólica no está muy desarrollada, hay que tener en cuenta que desde 1990 su tasa de crecimiento media anual ha sido del 25%, frente al 1,7% de crecimiento anual que tuvieron el resto de energías renovables.



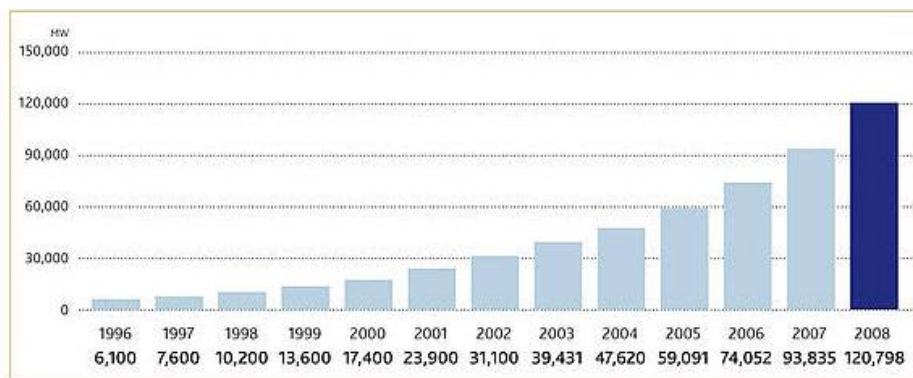
Gráfica 1.6: Tasas de Crecimiento Anual del Suministro Mundial de Renovables, 1990-2007. Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo (IDB)

En este contexto, se observa que la energía eólica tiene un papel importante. Se trata de una forma de energía no contaminante que está disponible, aunque no en igual medida, en todo el mundo. A pesar de que inicialmente no había muchos países que apostaran por ella debido al poco conocimiento que se tenía sobre ésta y a sus costos bastante elevados, como ya se ha explicado anteriormente, el mercado de la eólica ha ido

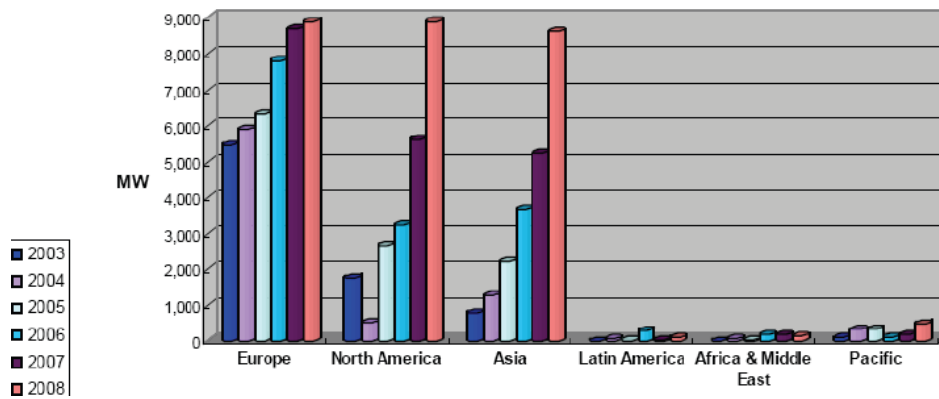
creciendo impulsado entre otros factores por la preocupación sobre el medio ambiente, la contaminación y el cambio climático, además de por las impresionantes mejoras que ha habido en la propia tecnología de la maquinaria eólica que han hecho que los costos hayan disminuido y que actualmente existan unos aerogeneradores muy mejorados en cuanto a su eficiencia.

Por todo ello, la tasa de crecimiento anual de los últimos años ha hecho que en el año 2008 se tuvieran más de 27GW de nuevas instalaciones, haciendo que el total de potencia instalada fuera 120GW. Si se continuara con esta potencia total instalada de 120 GW en el periodo hasta el año 2020, se podrían producir 260TWh, ahorrando 158 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año y pudiendo así evitar un cambio climático peligroso que hoy en día ya resulta inminente. Sin embargo, ya en 2010 la potencia instalada llegó a los 158,5 GW y en los próximos cinco años se prevé todavía un crecimiento mayor (crecimiento del 160%), haciendo que la cifra acumulada total pueda llegar a los 409 GW en el año 2014.

Por lo tanto, parece que la energía eólica podría ser una solución alternativa para conseguir frenar el cambio climático.

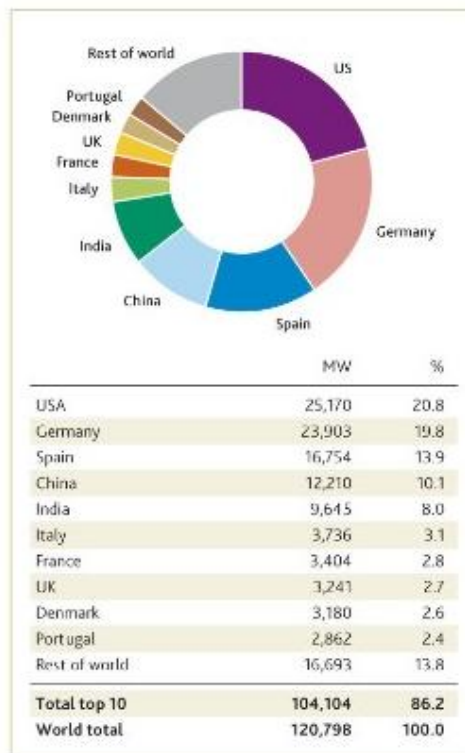


Gráfica 1.7: Capacidad total instalada entre 1996-2008. Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC)



Gráfica 1.8: Capacidad instalada por regiones entre 2003 y 2008. Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC)

Actualmente son tres regiones las mayores impulsoras del desarrollo eólico en el mundo. Éstas son América del Norte, Europa y Asia. Se cree que China instalará 20GW nuevos hasta el año 2014 consiguiendo así que el mercado asiático logre su objetivo de 150 GW para el año 2020 antes de la fecha prevista. Por su parte, el mercado norteamericano a pesar de los problemas de financiación que ha tenido en los últimos años, conseguirá para el año 2014 instalar una potencia nueva de 12,6 GW. Por último, Europa se mantendrá líder hasta el año 2013, momento en el que se verá superada por Asia.



Gráfica 1.9: Lista de los 10 países con mayor potencia instalada en 2008. Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC)



### 1.4.2 Energía eólica. Situación latinoamericana y boliviana

#### *Latinoamérica*

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE), las energías renovables en Latinoamérica ascienden a casi un 29% del suministro total de la energía primaria. Esta cifra parece muy alta, además de que impresiona si lo comparamos con la cuota del 5,7% de energías renovables en los países de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico).

Sin embargo, estos datos pueden resultar muy engañosos, ya que prácticamente hacen solamente referencia a la energía hidroeléctrica y a los biocombustibles, y teniendo en cuenta, que dentro de los biocombustibles a veces no se hace una clara distinción entre los clásicos y modernos y que algunos de ellos no ayudan a reducir los gases del efecto invernadero, quizá éstos no deberían ser considerados como renovables. Así, si eliminamos estas dos formas de energía, el porcentaje antes nombrado del 29% de suministro total desciende muchísimo, haciendo que los datos sean parecidos a los de otros países del mundo.

En lo que a recursos renovables se refiere, todos los países de la región latinoamericana cuentan con abundantes recursos (radiación solar, viento, altas precipitaciones, mareas,...). El problema que tienen las energías renovables en esta zona, son los costes elevados que tienen los equipos y la tecnología que éstos conllevan, pues la mayoría de estos países no dispone de la capacidad necesaria para instalarlos. Además de esto, otro inconveniente es el hecho de que están poco desarrolladas las mediciones de los recursos, para adecuar correctamente estos a las necesidades energéticas.

En cuanto a la energía eólica, ésta sigue creciendo en Latinoamérica, aunque este crecimiento tiene unas grandes diferencias entre los distintos países.

<b>País</b>	<b>Potencia instalada (a finales de 2010) [MW]</b>
Argentina	50
Brasil	920
Chile	172
Bolivia	0,01
Ecuador	2,5
Perú	0,7
Colombia	20
Uruguay	33,3

*Tabla 1.6: Potencia eólica instalada en Latinoamérica en MW por países a finales de 2010. Fuente: Asociación Latinoamericana de Energía Eólica (LAWEA)*

### *Bolivia*

En Bolivia, la energía eólica tiene una gran importancia en la electrificación rural de comunidades que no tienen acceso a la red eléctrica. Como ya se ha comentado, uno de los principales inconvenientes del desarrollo de las energías renovables en los países latinoamericanos es el acceso a la tecnología, por lo que para llevar a cabo la electrificación rural se utiliza una tecnología apropiada a las condiciones de uso específicas en cada territorio y población. Por ello, se ha optado por el desarrollo de aerogeneradores de baja potencia para este tipo de proyectos.

Estos proyectos con aerogeneradores de baja potencia se llevaron a cabo inicialmente en Perú, y viendo que resultaban rentables y cumplían con el propósito de llevar electricidad a comunidades aisladas, se comenzaron a llevar a cabo también en Bolivia.

Uno de los proyectos más importantes en la electrificación rural de Bolivia se llevó a cabo en 2008 con la colaboración de Soluciones Prácticas ITDG y la organización Ingeniería Sin Fronteras (ISF). En este proyecto se utilizaba un aerogenerador de baja potencia (100W) según el modelo IT-PE-100.

En lo que a energía eólica se refiere, Bolivia cuenta también con el Atlas Eólico. Se trata de un proyecto que fue iniciado por el Banco Internacional para el Desarrollo (IFC) y la Transportadora de Electricidad (TDE) para proporcionar datos geográficos del potencial de energía eólica en Bolivia. De esta forma se puede acceder a los datos eólicos de cualquier punto de Bolivia. Esto facilita la elección del emplazamiento del proyecto, ya que de esta forma se pueden descartar lugares con poco potencial eólico sin la necesidad de desplazarse hasta el sitio a realizar las mediciones correspondientes.

#### 1.4.3 Beneficios de la aerogeneración

Los aerogeneradores generan energía limpia y poco contaminante en comparación con los demás procedimientos de obtención de energías. Por ello, el impacto medio ambiental es mínimo. Además, es importante aclarar que los aerogeneradores durante su trabajo no contaminan y que el único momento en el que contaminan es durante su proceso de fabricación. Por eso se consideran equipos “poco contaminantes”.

Además se encuentran también beneficios en otras áreas.

##### *Seguridad*

Al ser un equipo que no necesita un operador para generar energía se considera un equipo seguro.

##### *Limpieza*

No produce residuos de ninguna especie.

##### *Ecológico*

No emplea combustibles.

### *Económico*

Actualmente la adquisición de un aerogenerador de baja potencias es más accesible con relación a otros métodos de generación de energía.

La energía generada por el aerogenerador no implica que deba pagarse a una entidad de usos y servicios.

### *Práctico*

Tiene múltiples aplicaciones como puede ser alumbrado domiciliario, alumbrado público, radio comunicaciones, salud, educación, etc.

Una vez instalado el aerogenerador, éste es totalmente autónomo en cuanto a generación de energía.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 EL RECURSO EÓLICO

El recurso para la generación de energía eólica es el viento, el cual es generado por corrientes de aire debido al desigual calentamiento de la superficie de la tierra. Así, la no uniformidad del flujo de radiación solar incidente hace que unas zonas se calienten más que otras, provocando movimientos convectivos de la masa atmosférica. El aire caliente asciende, arrastrando aire más frío proveniente de una región vecina. Al subir se enfría, por lo que aumenta su densidad, descendiendo para volver a repetir el ciclo. Así, el viento es una masa de aire en movimiento, y como tal, contiene una cierta energía cinética.

El fenómeno real es más complejo, ya que la Tierra se mueve sobre su eje. Además, hay una distribución aleatoria de las nubes sobre la superficie y la inercia térmica de los océanos es distinta a la de los continentes, lo que crea gradientes variables con el día y la noche.

#### 2.1.1 Aprovechamiento del viento

La energía del viento se origina por la energía radiante proveniente del sol, la cual se convierte en energía térmica al ser absorbida por la superficie terrestre. En cada uno de los pasos de conversión hay una serie de pérdidas, por lo que solamente un pequeño porcentaje del total de energía absorbida por la superficie terrestre se convierte en viento. A parte de estas pérdidas, también hay que tener en cuenta que del viento no se puede extraer toda la energía. En apartados posteriores se explicará la Ley de Betz, en la cual se concluye que solamente puede extraerse el 56% de la energía del viento.

#### 2.1.2 Velocidad del viento

A pesar de las muchas ventajas que tiene la energía eólica (no agresiva con el medio ambiente, inagotable,...), hay que tener en cuenta que tiene el inconveniente de que el viento es disperso y aleatorio. El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor es la diferencia de presiones y su movimiento está influenciado por el giro de la Tierra.

La velocidad del viento es una magnitud vectorial y ésta varía de forma aleatoria tanto en módulo como en dirección y sentido. Los valores medios suelen encontrarse entre 3 y 7 m/s. Sin embargo, dependiendo de la altitud y la topografía éstos pueden ser mayores o menores (valores mayores en altas montañas, valles estrechos y costas).

Para visualizar de forma más clara de donde proviene el viento se utiliza la rosa de los vientos. Para elaborarla se divide el horizonte circular de 360º en 8, 10, 12 o 16 divisiones, teniendo en cuenta los cuatro puntos cardinales (Este=90º, Sur=180º, Oeste=270º y Norte=360º) y se dibuja la dirección de donde proviene el viento. De esta forma se consigue determinar la dirección dominante de los vientos, que por lo general no coincide con la intensidad del viento, ya que en muchos casos los vientos más intensos no son los que soplan más horas al año procedentes de una determinada dirección.

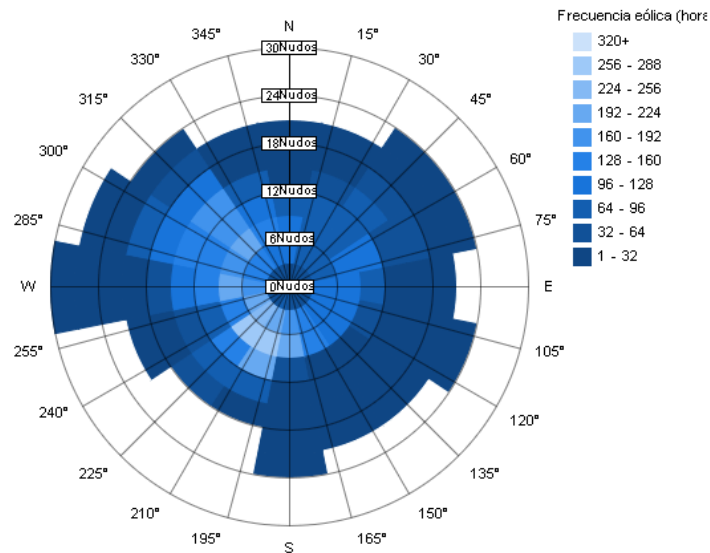


Imagen 2.1: Rosa de los vientos. Ejemplo de frecuencia de velocidades de viento. Fuente: [www.google.com](http://www.google.com)

La velocidad del viento puede variar de muy diversas maneras.

- *Variaciones estacionales:* los vientos globales sufren estas variaciones debido a la posición de anticiclones (zona atmosférica de alta presión) y borrascas (zona atmosférica de baja presión). Así, hay variaciones cíclicas del viento en función, por ejemplo, de las estaciones.
- *Variaciones diarias:* éstas son debidas a los efectos del calentamiento o enfriamiento diurno o nocturno, a la proximidad del mar,...
- *Variaciones en periodos muy cortos (ráfagas):* se pueden encontrar ráfagas medias, fuertes y violentas dependiendo del valor de viento medio (entre 5 y 20m/s). También se diferencian las ráfagas por la duración de ésta (pueden llegar a durar incluso 10 minutos).

## 2.2 MEDICIÓN DEL VIENTO

Para realizar una correcta medición del viento, se debe medir tanto su velocidad como su dirección. Por ello, serán necesarios un anemómetro y una veleta respectivamente.

Además, hay que tener en cuenta que datos obtenidos durante una campaña de medición de un año son poco representativos, dada la variabilidad del viento. Para que los datos sean representativos, la información eólica debe ser de periodos entre 25 y 30 años, aunque si esto no es posible los datos recogidos entre 5 y 10 años ya comienzan a ser bastante representativos.

### 2.2.1 Medida de la velocidad: anemómetro

Los anemómetros son instrumentos para medir la velocidad del viento. Éstos miden la velocidad instantánea del viento, sin embargo, las ráfagas de viento desvirtúan la medida que recogen si lo que se quiere es tener una idea de velocidades medias. Por ello, para conocer velocidades medias lo mejor es realizar diferentes mediciones en intervalos de unos 10 minutos y tomar como medida válida el valor medio de todas las mediciones llevadas a cabo.

Hay diferentes tipos de anemómetros:

- *Anemómetro de rotación:* dispone de cazoletas o hélices unidas al eje central, cuyo giro es proporcional a la velocidad del viento y se queda registrado. En el caso de los anemómetros magnéticos, este giro activa un diminuto generador eléctrico para dar una medida mucho más precisa.
- *Anemómetro de compresión:* se basa en el tubo de Pitot y está formado por dos pequeños tubos. Uno de ellos cuenta con un orificio frontal (que mide la presión dinámica) y otro lateral (que mide la presión estática). El otro tubo sólo cuenta con un orificio lateral. La diferencia entre las presiones medidas permite determinar la velocidad del viento.

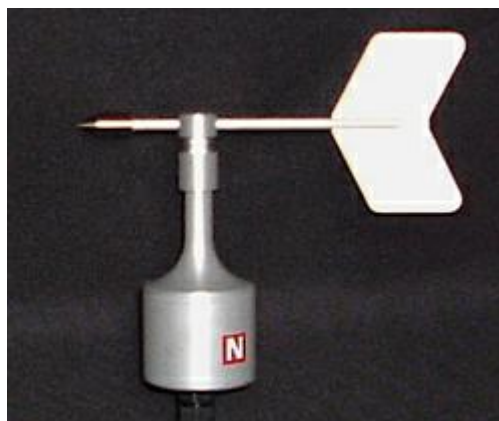
En el caso de los aerogeneradores de baja potencia, los anemómetros suelen ser montados sobre éstos para determinar si sopla el viento suficiente como para poner el aerogenerador en marcha. Por ello, dichos anemómetros no necesitan tener una gran precisión y suelen resultar bastante baratos. Sin embargo, en lo que a la industria eólica se refiere, sí son necesarios anemómetros mucho más precisos y bien calibrados. Por lo que éstos ya no resultan tan baratos.



*Imagen 2.2: Anemómetro de rotación. Fuente: [www.aerogeneradores.blogspot.com](http://www.aerogeneradores.blogspot.com)*

### 2.2.2 Medida de la dirección: veleta

Para la medición de la dirección del viento se utiliza la veleta, la cual suele colocarse próxima al anemómetro, todo en la misma torre. Como ocurría con la velocidad, la dirección sufre muchas fluctuaciones, por lo que el sistema tiene que ser capaz de determinar una dirección media. Para ello, suelen hacerse lo mismo que en el caso de la velocidad, se promedian valores instantáneos de dirección de la velocidad que se toman aproximadamente cada 10 minutos.



*Imagen 2.3: Veleta. Fuente: [www.aerogeneradores.blogspot.com](http://www.aerogeneradores.blogspot.com)*

### 2.2.3 Ubicación del sistema de medida

El conjunto de anemómetro y veleta se coloca en un mástil a una altura estándar que suele ser 10 metros (2 o 3 metros en el caso de estaciones móviles), para evitar perturbaciones del propio suelo. La torre del mástil suele ser un poste cilíndrico delgado y tensado por cables o vientos para evitar el apantallamiento de la torre.

Además, el lugar debe estar despejado para que los objetos no perturben las mediciones realizadas, ya que normalmente un objeto de altura  $h$  perturba el flujo de aire una distancia  $2h$  si está a barlovento y entre  $10h$  y  $20h$  si está a sotavento. Además, en vertical la perturbación puede llegar a alcanzar una altura de  $2h$ . Así, lo ideal es colocar los sensores en lugares cuyo horizonte no presente obstáculos en un radio de unos 300 metros, ya que edificios, bosques o irregularidades en el terreno pueden llegar a provocar distorsiones importantes en la toma de medidas.

En el caso de aerogeneradores de gran potencia, anemómetro y veleta se colocan a una altura de 50 metros, que es la altura a la que se encuentra el eje del generador. De esta forma las medidas tomadas serán mucho más fiables.

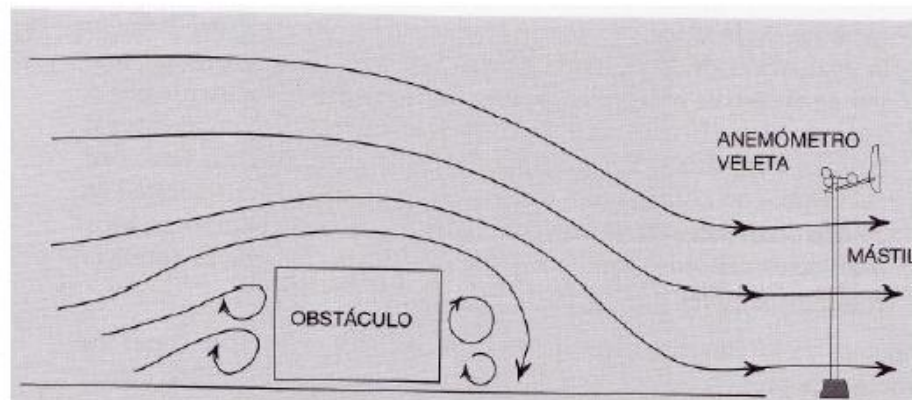


Imagen 2.4: Efecto de un obstáculo en la toma de medidas. Fuente: Energía eólica, Miguel Villarrubia

### 2.2.4 Escala Beaufort

En casos especiales en los que no se dispone del instrumento de medida para la velocidad del viento, se lleva a cabo una estimación de la misma observando los efectos que éste tiene en cuanto a humo, vegetación, superficie del mar,...

La escala que se utiliza en este caso se denomina escala de Beaufort, la cual tiene un origen marino y se utiliza desde el año 1848.



Grados Beaufort	Nudos		m/s		km/h		Descripción	Presión s/superficie Plana en daN/m <sup>2</sup>	
	de	a	de	a	de	a		de	a
0	<	1	0	0.2	<	1	Calma		
1	1	3	0.3	1.5	1.0	3.0	Vertolina	0.0	0.3
2	4	6	2.1	3.1	7.4	11.1	Brisa Suave	0.6	1.2
3	7	10	3.6	5.1	13.0	18.5	Brisa Leve	2	3
4	11	16	5.7	8.2	20.4	29.7	Brisa Moderada	4	9
5	17	21	8.8	10.8	31.5	38.9	Viento Refrescante	10	15
6	22	27	11.3	13.9	40.8	50.0	Viento Fuerte	17	25
7	28	33	14.4	17.0	51.9	61.2	Viento muy Fuerte	27	38
8	34	40	17.5	20.6	63.0	74.1	Temporal	40	55
9	41	47	21.1	24.2	76.0	87.1	Temporal Fuerte	58	76
10	48	55	24.7	28.3	89.0	101.9	Temporal muy Fuerte	79	104
11	56	63	28.8	32.4	103.8	116.8	Tempestad	108	137
12	64	71	32.9	36.5	118.6	131.6	Huracán	141	174
13	72	80	37.1	41.2	133.4	148.3		179	220
14	81	89	41.7	45.8	150.1	164.9		226	273
15	90	99	46.3	51.0	166.8	183.5		279	338
16	100	108	51.5	55.6	185.3	200.1		344	402
17	109	118	56.1	60.7	202.0	218.7	Ciclón	409	480

Tabla 2.1: Escala Beaufort para intensidades de viento. Fuente: Energía eólica. Teoría y características de Instalaciones, Sabino Mastrángelo

Grados Beaufort	Criterios de Apreciación en el Mar
0	Mar en calma
1	Se forman rizos con aspecto de escamas pero sin espuma en las crestas
2	Rizos cortos, pero pronunciados. Crestas con aspectos cristalinos que no se rompen
3	Grandes Rizos. Las crestas comienzan a romper. Espuma de aspecto cristalino
4	Las olas cortas se alargan
5	Se forman crestas en las ondas de aguas acumuladas e estanques y lagunas
6	Comienzan a formarse grandes olas. Las crestas de espuma blanca se forman por todas partes. Brumazones
7	Se agita y la espuma de blanca de las olas comienza a formar regueros
8	Olas altas de mayor longitud. Las crestas comienzan a pulverizarse en brumas. La espuma se escapa
9	Las olas muy altas comienzan a romperse. Las brumas reducen la visibilidad
10	Se rompen violentamente las olas muy altas. Masas de espuma. Superficie del agua blanca. Visibilidad pobre

Tabla 2.2 Criterios de apreciación de la intensidad del viento en la escala Beaufort en el mar. Fuente: Energía eólica. Teoría y características de instalaciones, Sabino Mastrángelo

Grados Beaufort	Criterios de Apreciación en Tierra
0	El humo se eleva verticalmente
1	El viento inclina el humo pero no hace girar las veletas
2	Las hojas se mueven. El viento se siente en el rostro, giran las veletas
3	Las hojas y ramas pequeñas se mueven continuamente. Las banderas de tejido suave se extienden
4	El viento levanta el polvo y papeles sueltos, las ramas se agitan
5	Los árboles pequeños frondosos empiezan a balancearse
6	Se mueven ramas grandes. Vibran los hilos eléctricos, se oye el silbido. Resulta difícil utilizar el paraguas
7	Los árboles se agitan. Es molesto caminar contra el viento
8	Se rompen las ramas pequeñas. Se hace difícil caminar
9	Las ramas medianas se quiebran. Pequeños daños en las estructuras edilicias (se arrancan sombreretes de chimeneas, tejas de los techos, etc.)
10	Los árboles son arrancados de cuajo y daños estructurales considerables
> 11	Destrozos extensos. Techos arrancados, etc.

Tabla 2.3 Criterios de apreciación de la intensidad del viento en la escala Beaufort en la tierra. Fuente: *Energía eólica. Teoría y características de instalaciones, Sabino Mastrángelo*

### 2.2.5 Obtención de datos mediante el atlas eólico: First Look

Como ya se ha comentado con anterioridad, Bolivia cuenta con un atlas eólico que permite conocer los datos de viento de cualquier punto de su geografía. De esta forma, se tiene información sobre decisiones óptimas a la hora de planificar el aprovechamiento del viento y comenzar un nuevo proyecto.

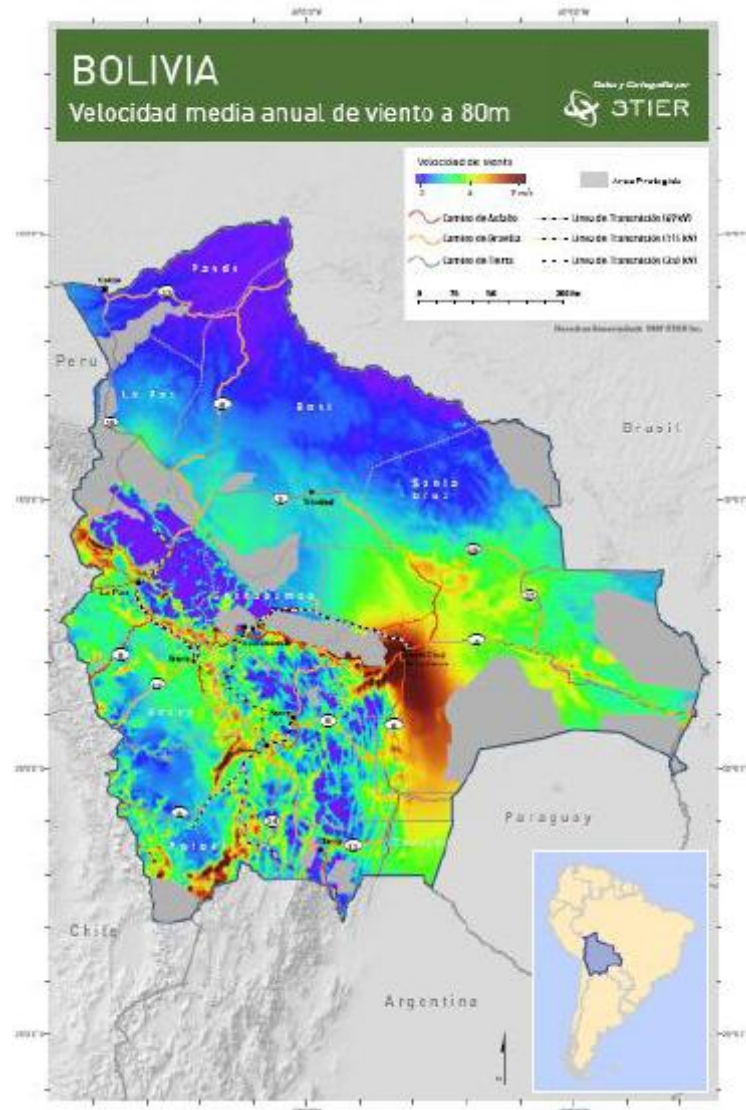


Imagen 2.5: Distribución de velocidades de viento en Bolivia según el atlas eólico. Fuente: [www.tde.com.bo](http://www.tde.com.bo)

### 2.3 CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL VIENTO

Para caracterizar el viento, se utiliza la ley de densidad de probabilidad de Weibull, que permite modelar la distribución de la velocidad del viento de tal forma que mediante una expresión matemática se puede predecir de manera aproximada el comportamiento de la velocidad del viento a lo largo de un periodo de tiempo en un lugar determinado.

La distribución de Weibull tiene la siguiente expresión:

Función de densidad de probabilidad:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Función de distribución:

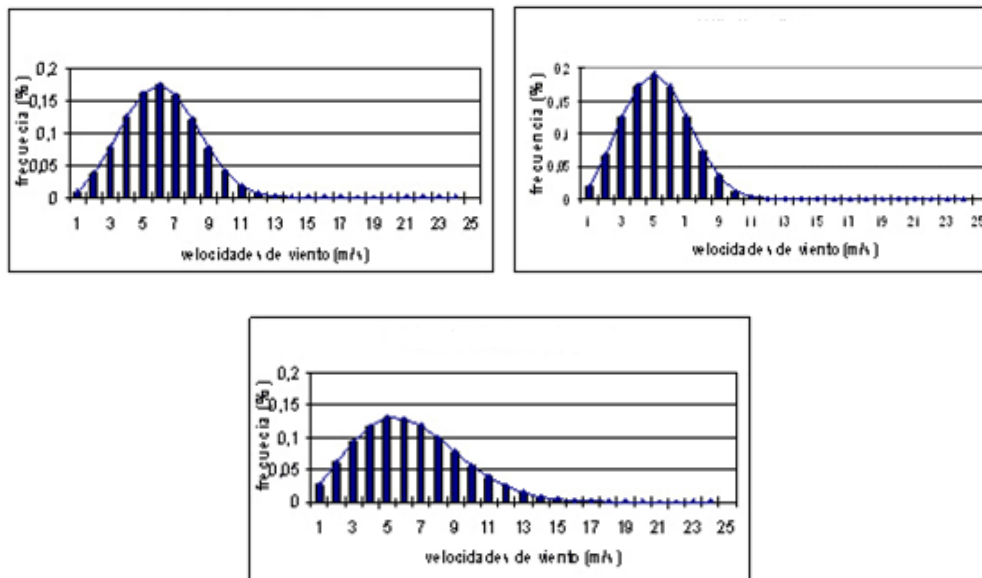
$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Donde

c: factor de escala

k: factor de forma

Tanto el factor de escala como el de forma variarán dependiendo de los datos de viento que tengamos para que la expresión matemática se aproxime a los datos reales.



*Imagen 2.6: Distribuciones Weibull con diferentes factores de forma y escala. Fuente: Ingeniería Mecánica, Deivis Avila*

Sin embargo, a la hora de caracterizar energéticamente el viento, no solo hay que tener en cuenta la aproximación de los datos eólicos mediante una distribución Weibull, sino que hay una serie de aspectos que alteran las características del viento, como son la altura, el relieve que tenga el terreno o la influencia de los obstáculos que pueden encontrarse cerca.

### 2.3.1 Variación de la velocidad del viento con la altura

La velocidad del viento varía con la altura debido principalmente a las turbulencias tanto de origen mecánico (causadas por las irregularidades de la superficie del terreno) como de origen térmico (causadas por el gradiente de temperatura del aire que provoca corrientes convectivas en sentido vertical).

Como en general la influencia del gradiente de temperatura del aire en una diferencia de altura de 100 metros (diferencia de altura razonable en el caso de los aerogeneradores de gran potencia) es pequeña no se tendrán en cuenta los efectos de las turbulencias térmicas, y solamente se tendrán en cuenta los efectos de las irregularidades de la superficie del terreno.

Conforme nos separamos del terreno, los efectos de rozamiento disminuyen y por lo tanto, la velocidad del viento aumenta. Así, se tiene un gradiente o variación de la velocidad con la altura, y se habla del perfil vertical de la velocidad del viento. La variación de la velocidad del viento con la altura depende de la rugosidad que tenga el terreno. Así, si se tienen superficies lisas (con agua, terrenos llanos, llanuras nevadas,...), el gradiente de velocidad es suave. Sin embargo, si se tienen superficies con gran rugosidad (terrenos con edificaciones urbanas, superficies boscosas,...) el gradiente de velocidad será mayor.

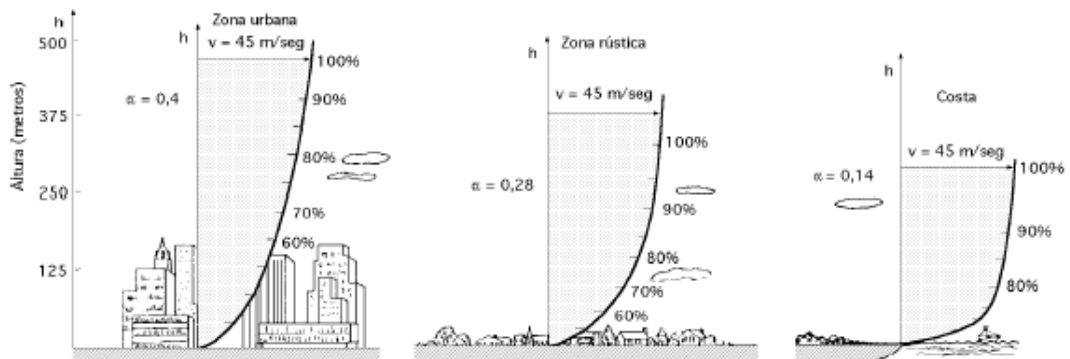


Imagen 2.6: Perfil vertical de la velocidad del viento. Fuente: Diseño estructural de aerogeneradores, Raúl Campos, Universidad de Chile

De esta forma, se define el parámetro  $Z_0$ , denominado longitud de rugosidad para caracterizar las condiciones del terreno. Así, las superficies lisas con poca rugosidad tienen valores pequeños de  $Z_0$  y las superficies más rugosas cuentan con valores mayores de  $Z_0$ .

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad $Z_0$ (m)	Índice de energía	Tipo de terreno
0	0.002	100	Superficie de agua. Terreno abierto, superficie lisa
0.5	0.0024	73	Pistas de hormigón (aeropuertos), césped
1	0.030	52	Campos abiertos sin cercados de setos. Edificios muy dispersos. Colinas suavemente reforzadas
1.5	0.055	45	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8m situado como mínimo a 1250 m
2	0.1	39	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8m situado como mínimo a 500 m
2.5	0.2	31	Campo con muchas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 250 m
3	0.4	24	Pueblos, bosques y terreno accidentado y desigual
3.5	0.8	18	Ciudades con edificios altos
4	1.6	13	Grandes ciudades con edificios muy elevados

Tabla 2.4: Clases y longitudes de rugosidad. Fuente: energía eólica, Miguel Villarrubia

Gracias a este parámetro se puede calcular la velocidad de viento medio o estacionario en una altura determinada mediante la siguiente fórmula:

$$V' = V \frac{\ln\left(\frac{Z'}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Donde

V: velocidad conocida a una altura determinada Z

V': velocidad que se quiere conocer a la altura Z'

$Z_0$ : rugosidad del terreno

### 2.3.2 Variación de la velocidad del viento con la orografía del terreno

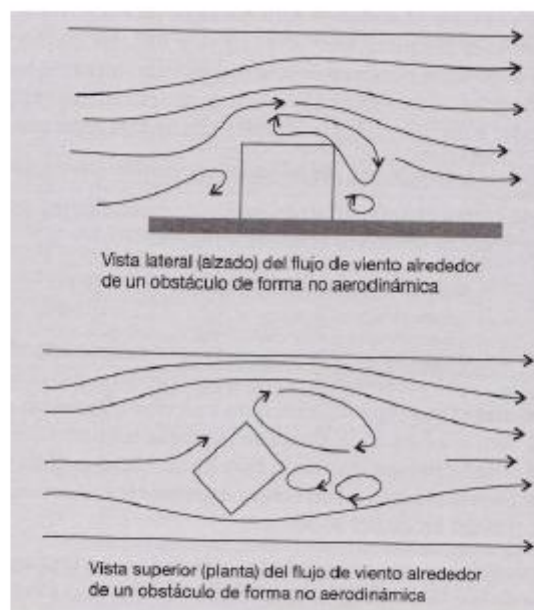
El relieve del terreno también es otro factor a tener en cuenta en la influencia sobre la velocidad del viento. Las elevaciones de terreno (montañas, colinas, acantilados,...) pueden aumentar la velocidad del viento si tienen pendientes suaves o pueden disminuirla si son con pendientes fuertes o crestas.

Así, para instalar un aerogenerador los lugares más adecuados son las colinas suaves con pendientes escasas de alta vegetación u obstáculos, ya que de esta forma se consigue aumentar la velocidad del viento (aceleración) y también los acantilados o colinas próximas al mar con suaves pendientes.

Sin embargo, los lugares menos adecuados para la instalación de estas máquinas son los acantilados y escarpados con fuertes pendientes, ya que se forman turbulencias que además de reducir la energía que puede producir el aerogenerador, crean esfuerzos mecánicos de fatiga que hacen reducir la vida útil de la máquina.

### 2.3.3 Variación de la velocidad del viento con la existencia de obstáculos

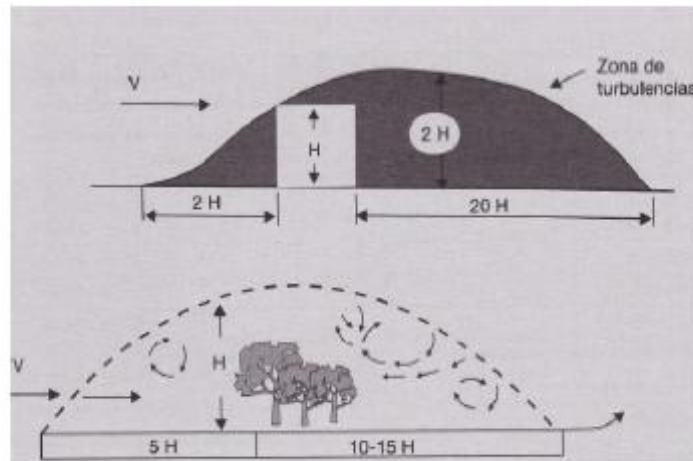
Los obstáculos (edificios, árboles, accidentes en el terreno,...) provocan una disminución de la velocidad del viento, así como un aumento de las turbulencias. Por lo que a la hora de instalar grandes centrales eólicas se tendrá que tener en cuenta la presencia de obstáculos en un radio de 1km en la dirección dominante del viento.



*Imagen 2.7: Efecto de un obstáculo no aerodinámico sobre el flujo del viento. Fuente: Energía eólica, Miguel Villarrubia*



La zona de turbulencias es muy variable. Éstas son más acusadas en la parte posterior del obstáculo (sotavento) que en la parte anterior (barlovento). Como se ha comentado con anterioridad a sotavento pueden alcanzar entre 10 y 20 veces la altura del obstáculo y a barlovento solamente puede alcanzar unas 2 veces dicha altura.



*Imagen 2.8: Zona de perturbación y turbulencia originada por edificios y arbolado. Fuente: Energía eólica, Miguel Villarrubia*

La disminución de la velocidad del viento aguas abajo del objeto no depende sólo de su forma y dimensiones, sino que también depende de su porosidad. A mayor porosidad mayor es la distancia que se mantiene la disminución de velocidad de viento aguas abajo del obstáculo. Sin embargo, el nivel de turbulencia es menor en el caso de los objetos porosos.

El hecho de que los obstáculos influyan en la variación de la velocidad del viento hace que en los parques eólicos los aerogeneradores estén distanciados unos de otros entre 5 y 9 veces lo que mide el diámetro de su rotor en la dirección del viento dominante y entre 3 y 5 veces el diámetro en la dirección perpendicular. De esta forma se consigue evitar los efectos de sombra eólica de unos aerogeneradores sobre otros.

#### 2.3.4 Variación de los parámetros de Weibull con la altura

A partir de una distribución Weibull con parámetros de forma y escala conocidos para una altura determinada, se ha desarrollado la siguiente expresión empírica que permite hallar estos parámetros de forma y escala para una nueva altura.



Así, se tiene:

Factor de forma:

$$k' = k \frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{z}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{z'}{10}\right)}$$

Factor de escala

$$c' = c \left(\frac{z'}{z}\right)^\beta$$

Donde

Z: altura a la que se conoce la distribución Weibull.

k: factor de forma conocido a la altura z.

c: factor de escala conocido a la altura z.

z': altura a la que se quiere conocer los parámetros de la distribución Weibull

$\beta$ : coeficiente que viene dado por la expresión:  $\beta = \frac{0,37 - 0,088 \ln c}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{z}{10}\right)}$

## 2.4 POTENCIA EÓLICA DISPONIBLE: POTENCIAL EÓLICO

La energía se define como la capacidad para realizar un trabajo. La potencia en cambio se define como la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo. Por lo que ambas están relacionadas de la siguiente forma:

$$Potencia = \frac{Energía}{tiempo}$$

Una masa de aire  $m$  con velocidad  $v$  posee una energía cinética  $E_c$  que viene dada por:

$$E_c = 0,5mv^2$$

El caudal másico de aire  $\dot{m}$  de densidad  $\rho$  que fluye a través de una superficie de área  $A$  perpendicular a la dirección del flujo, viene dado por la ecuación de continuidad:

$$\dot{m} = \rho Av$$

La potencia disponible asociada al caudal de aire que atraviesa dicha sección es:

$$P_d = 0,5\dot{m}v^2 = 0,5\rho Av^3$$

En cuanto al valor de esta potencia disponible, hay que tener en cuenta otros factores que disminuirán su valor como son el límite de Betz, los rozamientos aerodinámicos y mecánicos, el rendimiento del generador eléctrico,... permitiendo, solamente un aprovechamiento máximo del 40% de dicha potencia.

La densidad de potencia o potencia por unidad de área se define como:

$$\frac{P_d}{A} = 0,5\rho v^3$$

De esta expresión se pueden sacar una serie de conclusiones:

- La densidad de potencia depende del cubo de la velocidad. Así, si la velocidad aumenta un 10%, la densidad de potencia crece en un 33%. De aquí la importancia de la colocación del aerogenerador a la mayor altura posible sobre el nivel del suelo, por lo que se ha comentado sobre el perfil de velocidades, es decir que la velocidad crece con la altura.

- Dada la variación de la potencia con respecto a la velocidad según una ley cúbica, es muy importante para decidir la instalación de un aerogenerador disponer de medidas fiables de velocidad a la altura del centro de giro. Hay que tener en cuenta que cualquier error en la medición o en la estimación de alturas y velocidades pueden acarrear resultados no deseados en cuanto a la obtención de la energía.

- La potencia eólica disponible es directamente proporcional al área considerada.

- La densidad de potencia depende linealmente de la densidad del aire, por lo que un aire frío presenta una densidad de potencia superior a una más caliente. Asimismo, y a igualdad de temperatura, un lugar situado a nivel del mar presentara una densidad de potencia mayor a otro a una altitud mayor por el hecho de que la densidad del aire disminuye con la altura.

Dada la variabilidad de la velocidad, la caracterización del potencial eólico disponible de un lugar se debe realizar a partir de la determinación de los valores de la potencia correspondientes a cada velocidad y promediar estos para un determinado tiempo. De esta forma se define la energía eólica disponible de un lugar como la potencia media eólica por unidad de superficie para un determinado periodo de tiempo, generalmente un año, supuesta una densidad del aire constante.

#### 2.4.1 Variación del potencial eólico con la altura

A veces se conoce el potencial eólico para una altura respecto al nivel del suelo y se desea determinar su valor para otra altura. En este caso, si se admite para la velocidad media actual una variación con la altura basada en una ley de tipo potencial, la variación aproximada de potencial eólico con la altura viene dada por:

$$\frac{\text{Potencial eólico}'}{\text{Potencial eólico}} = \left(\frac{z'}{z}\right)^{3a}$$

Esta expresión solamente nos proporcionará valores aproximados, ya que como se ha visto con anterioridad, la distribución Weibull varía con la altura.

## 2.5 DESCRIPCIÓN DE LAS MÁQUINAS EÓLICAS DE BAJA POTENCIA

Los aerogeneradores más completos tienen los siguientes componentes:

- *Góndola*: carcasa que protege las partes fundamentales del aerogenerador.
- *Palas del rotor*: transmiten la potencia del viento hacia el buje.
- *Buje*: parte que une las palas del rotor con el eje de baja velocidad.
- *Eje de baja velocidad*: conecta el buje del rotor al multiplicador.
- *Multiplicador*: permite que el eje de alta velocidad gire mucho más rápido que el eje de baja velocidad.
- *Eje de alta velocidad*: gira a gran velocidad, permitiendo el funcionamiento del generador eléctrico.
- *Generador eléctrico*: transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
- *Controladores electrónicos*: monitorizan las condiciones de viento y controlan el mecanismo de orientación.
- *Unidad de refrigeración*: mecanismo para enfriar el generador eléctrico.
- *Torre*: parte del generador que soporta la góndola y el rotor.
- *Mecanismo de orientación*: activado por los controladores electrónicos, permite colocar el aerogenerador de tal manera que se obtenga la máxima potencia.

El aerogenerador a diseñar en este proyecto no contará con todos estos elementos, ya que será mucho más sencillo, tanto de fabricar como de manejar.

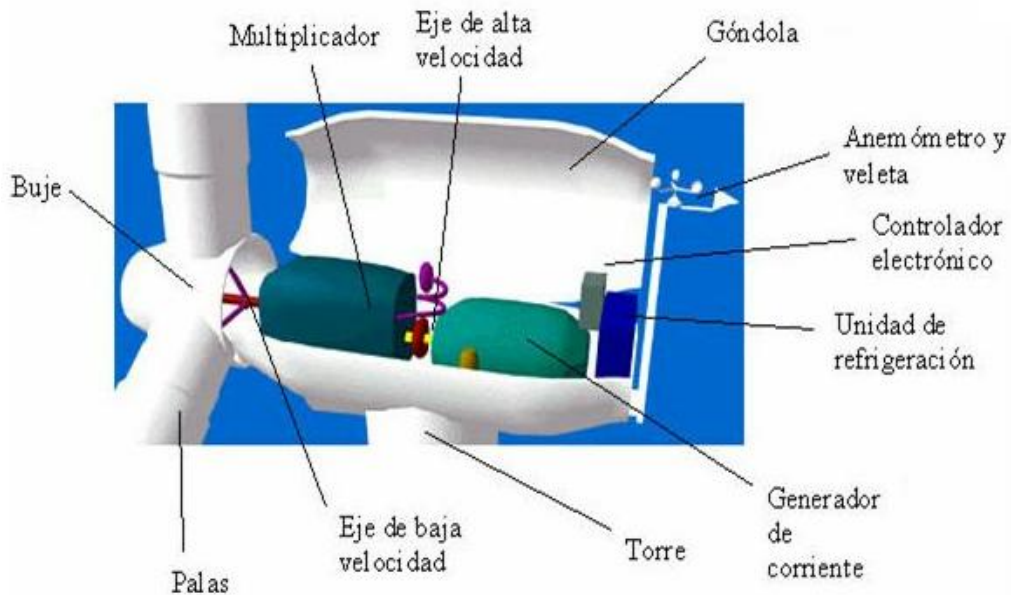


Imagen 2.9: Partes de un aerogenerador. Fuente: [www.google.com](http://www.google.com)

### 2.5.1 Teorema de Betz

El Teorema de Betz es de mucha importancia para las máquinas eólicas, se puede decir que es tan importante para las máquinas eólicas como lo es el Teorema de Carnot para las máquinas térmicas. La teoría de Betz, supone que una vena fluida en una corriente no perturbada delante de una turbina eólica posee una velocidad  $v_1$ , y que en el infinito, aguas abajo de la misma, posee una velocidad  $v_2$ .

Vamos a suponer que la energía eólica se puede recuperar y transformar mediante un aerogenerador. La pala se supone inmersa en una corriente de aire de velocidad  $v$  que, aguas abajo, posee una velocidad  $v_2$  no nula, lo que asegura que no es posible la transformación y recuperación de toda la energía del viento en otra forma de energía.

Se supondrá que aguas arriba de la pala, el aire que circula por el tubo de corriente, posee una velocidad  $v_1$  en la sección transversal ficticia  $A_1$ , que es la velocidad del viento sin perturbar, mientras que la velocidad  $v_2$  se corresponde con otra sección transversal ficticia  $A_2$  aguas abajo de la zona en que se encuentra la pala. En el plano que contiene la pala, la sección transversal batida por la misma sería un disco imaginario de sección  $A$ , siendo  $v$  la velocidad útil del viento en la misma.

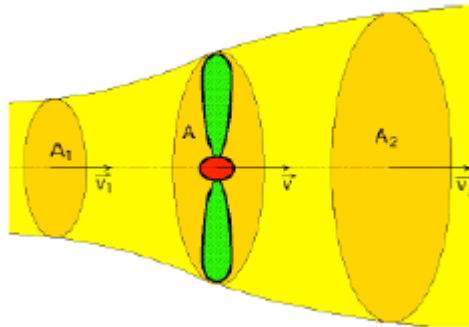


Imagen 2.10: Esquema del movimiento del aire a través de un conducto. Fuente: Energía eólica, Pedro Fernández Díez

La pala se supone como un disco de diámetro  $d$  que capta la energía del aire en movimiento que llega a él. Si el disco fuese capaz de captar toda la energía cinética del viento, aguas abajo del mismo el aire estaría en reposo y, por lo tanto, la velocidad sería  $v_2 = 0$ .

Suponiendo que el gasto másico  $G$  de aire que circula por el tubo es constante, se puede poner:

$$G = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \rho A v$$

La variación de la energía cinética del viento en la unidad de tiempo es de la forma:

$$\Delta E_{cinética} = E_{c1} - E_{c2} = \frac{G}{2} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho A v}{2} (v_1^2 - v_2^2)$$

La fuerza "F" ejercida por el viento en la unidad de tiempo  $\Delta t = 1$  sobre el área ficticia "A" barrida por la pala, es igual a la variación de la cantidad de movimiento del aire que la atraviesa; el trabajo generado por esta fuerza "F" en la unidad de tiempo, es la potencia  $N_{útil}$ , de la forma:

$$N_{util} = Fv = \rho A v (v_1 - v_2) v = \rho A v^2 (v_1 - v_2)$$

Que es igual a la variación de energía cinética del aire, en el mismo tiempo, pudiéndose poner:

$$\rho A v^2 (v_1 - v_2) = \frac{\rho A v}{2} (v_1^2 - v_2^2) \rightarrow v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Si se hace el cambio  $v_2 = b v_1$  con  $(0 < b < 1)$ , resulta:

$$N_{util} = \frac{\rho A (v_1 + v_2)}{4} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho A v_1^3}{4} (1 + b)(1 - b^2)$$

El máximo valor de  $N_{\text{útil}}$  se obtiene haciendo  $\frac{dN_{\text{útil}}}{db} = 0$ , resultando:

$$(1 - b^2) + (1 + b)(-2b) = 0; (1 + b)(1 - 3b) = 0$$

Cuyas soluciones son:

$$\left\{ \begin{array}{l} b = -1, \text{ que no cumple con la condición } (0 < b < 1) \\ b = \frac{1}{3} = \frac{v_2}{v_1}; v_1 = 3v_2 \end{array} \right.$$

Que permite hallar la potencia máxima suministrada por el rotor, de valor:

$$N_{\text{útil max}} = \frac{\rho A v_1^3}{4} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right) = \frac{8\rho A v_1^3}{27} = 0,37v_1^3$$

Que se conoce como *ecuación de Betz*, y en la que se ha tomado como densidad media del aire ( $\rho = 1,25$ ) kg/m<sup>3</sup>.

De todo esto se deduce que la potencia máxima teórica es proporcional al diámetro  $D$  del círculo barrido por la pala y al cubo de la velocidad nominal del viento  $v_1$ .

Como la potencia del viento aguas arriba de la pala, viene dada por la expresión:

$$N_{\text{disponible viento}} = \frac{\rho A v_1^3}{2} = 0,625A v_1^3$$

El rendimiento máximo aerodinámico (o factor de potencia máximo) es:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{N_{\text{útil max}}}{N_{\text{viento}}} = \frac{16}{27} = 0,595 = 59,5\%$$

Que es el límite teórico o coeficiente de Betz, resultado que ninguna máquina eólica, por muy sofisticada que sea, puede superar.

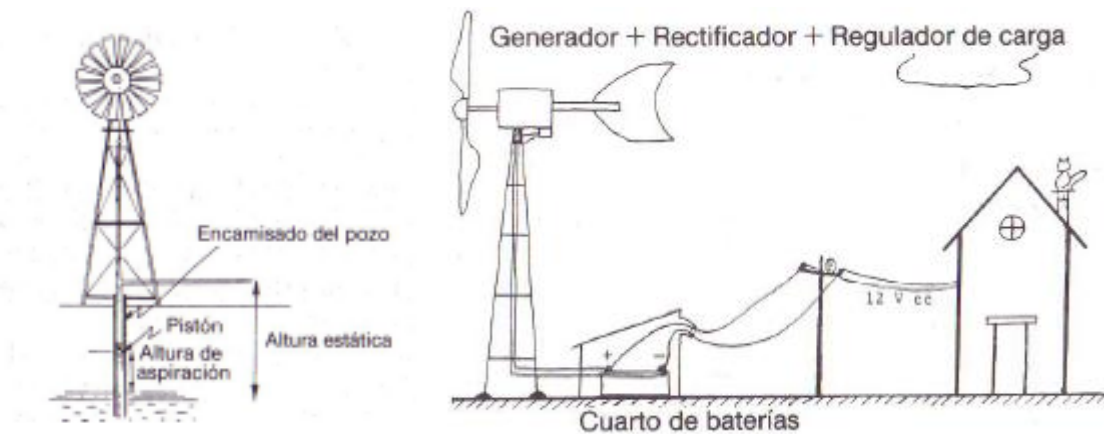
### 2.5.2 Clasificación de las máquinas eólicas

La clasificación de las maquinas eólicas puede realizarse atendiendo a los siguientes aspectos:

- Usos.
- Potencias.
- Número de palas.
- Velocidades de trabajo.
- Disposición del eje del rotor.

#### *Clasificación por usos*

Esta clasificación de las máquinas eólicas tiene en cuenta el tipo de trabajo que se va a realizar con ella. Este trabajo puede ser bombeo de agua, generación de energía eléctrica, molienda de granos.



*Imagen 2.11: a) Máquina eólica para bombeo de agua de pozo. b) Máquina eólica para generación eléctrica. Fuente: Diseño de pequeñas máquinas eólicas de baja potencia, Mario Rosato*

#### *Clasificación por potencias*

La clasificación por potencia nominal divide las máquinas eólicas en los siguientes grupos:

- **Microturbinas (<3kW):**

Suelen ser utilizadas en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento. El generador eléctrico que normalmente utilizan es de imanes permanentes, y no suelen contar con caja multiplicadora entre el eje del rotor del aerogenerador y el generador eléctrico.

Habitualmente se trata de máquinas de eje horizontal con tres palas y diámetros pequeños (entre 1 y 5 metros) que trabajan a velocidades de rotación elevadas y generalmente variables. La electricidad que producen está en forma de corriente alterna de frecuencia variable, por lo que ésta es rectificadora, almacenada en baterías y posteriormente se convierte de nuevo en alterna pero de frecuencia constante mediante un inversor. Finalmente un transformador es el que se encarga de subir la tensión a la que requiera el servicio.

Ejemplo: máquinas eólicas que se encargan de accionar bombas hidráulicas para la extracción de agua de los pozos.

- **Pequeños aerogeneradores (<50kW):**

También suelen ser utilizados en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento, es decir, cubren una demanda similar a la del grupo anterior, pero teniendo una mayor potencia. Además, también suelen utilizarse para formar sistemas híbridos, es decir, sistemas que combinan la energía eólica con otro tipo de energía como puede ser solar, hidráulica, diesel,...

Si la potencia es hasta 10kW el tipo de generador eléctrico sigue siendo de imanes permanentes y sin hacer uso de caja multiplicadora. Sin embargo, para una gama de potencias más alta se introducen cajas de engranajes entre el eje del rotor y el del generador, ya que el generador eléctrico funciona a unas velocidades mucho mayores que las del rotor del aerogenerador.

Ejemplo: máquinas eólicas que se encargan de la iluminación de granjas de animales.

- **Grandes aerogeneradores (<850kW):**

En este caso, la producción de electricidad ya se inyecta a la red. Suelen ser aerogeneradores rápidos de eje horizontal que cuentan normalmente con tres palas. Sus potencias suelen estar comprendidas entre 200 y 850 kW y sus diámetros entre 25 y 55 metros. Cuentan con cajas de engranajes para aumentar la velocidad y así poder accionar el generador eléctrico y sus palas suelen contar con un sistema de regulación (ya sea activo o pasivo) mediante el que se controla la potencia del rotor en función de la velocidad del viento.

Ejemplo: parques eólicos cuando éstos se encuentran en terrenos complejos.

- **Aerogeneradores multimegawatt (1-3MW):**

La electricidad que producen también se inyecta a la red. Son similares a los anteriores en cuanto a cajas de engranajes y sistemas de regulación, sin embargo sus diámetros son mucho mayores (entre 50 y 90 metros) y su altura suele estar entre 60 y 100 metros.

Ejemplo: parques eólicos offshore.



### *Clasificación por número de palas*

#### - **Hélices de una pala:**

La utilización de una turbina eólica monopala aumenta la velocidad de rotación del rotor y por tanto reduce las masas y costos de los demás elementos como el multiplicador y el generador eléctrico. Además, económicamente hablando el costo es muy pequeño, ya que la fabricación es sencilla y la cantidad de materiales también, por el hecho de contar sólo con una pala.

Sin embargo, estas turbinas requieren un contrapeso para que se compense la única pala, y además, el desequilibrio aerodinámico en este modelo es muy grande y causa problemas de fatiga. Otra desventaja es que la velocidad en punta de pala al ser muy alta provoca mucho ruido aerodinámico. Si comparamos este rotor con los rotores tripalas vemos que la velocidad en punta de pala es dos veces mayor en los monopala, por lo que el nivel sonoro resultante es bastante elevado.



*Imagen 2.12: Hélice monopala. Fuente: Energía eólica, Pedro Fernández Diez*

#### - **Hélices de dos palas:**

El costo del rotor es menor que en uno tripala, sin embargo debido a los fluctuantes esfuerzos dinámicos que se originan con esta configuración se requieren dispositivos especiales para disminuir el estado de carga, lo que eleva finalmente el costo global de la máquina, perdiéndose la ventaja económica respecto a la tripala. Además, en cuanto a vibraciones, los bipala son más sensibles que los tripala, ya que tienen mayores velocidades en punta de pala.

Además, igual que ocurría en los monopala, los bipala poseen la posibilidad de fijarse al cubo del rotor mediante un dispositivo de oscilación, efecto denominado teetering, una especie de bisagra que permite compensar los esfuerzos que provoca la variación del perfil de velocidad del viento con la altura, lográndose un patrón de esfuerzos externos algo más plano a lo largo del área barrida por la pala. Otras ventajas se dan en la fabricación, ya que si es de poca potencia y con sistema de control Stahl, su fabricación se puede hacer en un único bloque.



*Imagen 2.13: Hélice bipala. Fuente: Energía eólica, Pedro Fernández Díez*

- **Hélices de tres palas:**

Una de las razones principales para la utilización de tres palas es el momento debido a Coriolis constante, casi nulo, del rotor respecto a los movimientos operacionales alrededor del eje longitudinal de la torre. Todos los rotores con tres o más palas tienen esta propiedad favorable. Por lo que no induce ninguna carga sobre la estructura debido a éste fenómeno lo que acontece en una simplificación estructural y reducción en los costos de fabricación.

La característica fundamental de esta configuración es su mayor suavidad de funcionamiento respecto a las anteriores. Los rotores de tres palas tienen velocidades de rotación relativamente bajas, lo son también las de punta de pala, constituyendo una gran ventaja respecto a los monopalas y bipalas debido a la reducción en el nivel de ruido que esto conlleva.

Asimismo, de manera diferente a las hélices mono y bipalas las de tres palas gozan de una gran aceptación pública en cuanto al impacto visual que ocasionan.



*Imagen 2.14: Hélice tripala. Fuente: Energía eólica, Pedro Fernández Díez*

- **Hélices multipalas:**

Los rotores multipala, tipo americano, tienen por uso casi excluyente el bombeo de agua. Su elevada fuerza de arranque y su relativo bajo costo los hace muy aptos para accionar bombas de pistón. Se estima que en el mundo existen más de 1.000.000 de molinos de este tipo en operación.



*Imagen 2.15: Hélice multipala. Fuente: Energía eólica, Pedro Fernández diez*

*Clasificación por velocidades de trabajo*

La clasificación de las máquinas eólicas según su velocidad de funcionamiento hace dividirlas en los siguientes grupos:

- **Máquinas eólicas rápidas:**

En este caso, el número de palas suele ser pequeño y como su potencia por unidad de peso es mayor y además son más ligeros, se pueden construir con radios mucho mayores y situar el buje a alturas también mayores, aprovechando de esta forma el aumento de la velocidad del viento con la altura. Actualmente se construyen rotores de hasta 90 metros de diámetro, alcanzando su potencia nominal los 300kW.

Requieren mayores velocidades de viento para su arranque que las eólicas lentas (necesitan 4-5m/s frente a los 2-3m/s que necesitan las lentas), alcanzan su potencia nominal a velocidades de viento entre 12 y 15 m/s y a partir de 25-30m/s se produce la parada del rotor para evitar daños en la máquina. El valor máximo del coeficiente de potencia  $C_p$  está en torno al 0,4 y se da para valores de velocidad específica entre 7 y 10 (valores mayores que en el caso de las eólicas lentas).

Además, como tienen un menor número de palas, es más fácil incorporar mecanismos de control de variación de ángulos de ataque con respecto a la dirección del viento, para así proteger mejor el equipo.

- **Máquinas eólicas lentas:**

Normalmente cuenta con un elevado número de palas (entre 12 y 24) y su sistema de orientación se da mediante un timón-veleta que hace que el plano de la hélice esté siempre situado perpendicular al viento. Su diámetro es menor que en las máquinas eólicas rápidas (entre 1 y 3 metros), ya que éste está limitado por el peso del rotor y para que arranquen necesitan velocidades de viento entre 2-3m/s.

Sus aplicaciones son sobretudo en instalaciones de extracción y bombeo de agua.

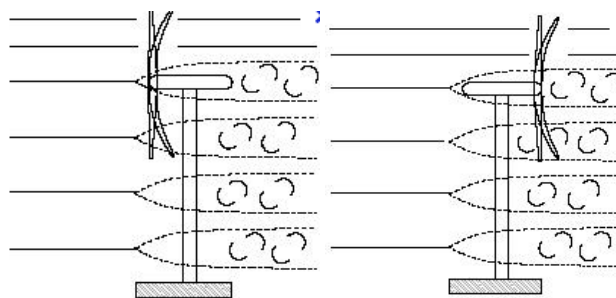
*Clasificación por disposiciones del eje del rotor*

Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo a la disposición del eje del rotor en:

- **Aerogeneradores de eje horizontal:**

Este tipo de aerogeneradores son los más comunes y los más eficientes en temas de conversión. Esta conversión se realiza mediante dispositivos ubicados en la misma torre, como es el caso de las turbinas eólicas destinadas a la producción de electricidad, donde el generador eléctrico está localizado en la cúpula.

Las denominas máquinas rápidas, con palas de perfil aerodinámico y casi exclusivamente empleadas para la generación de electricidad, tiene rotores de 1 a 3 palas que pueden estar ubicados a popa (*sotavento*) o a proa (*barlovento*) de la cúpula. Los rotores con palas a sotavento no requieren de sistemas de orientación pues las fuerzas en juego tienden a orientarlo naturalmente, aunque en máquinas de gran tamaño se prefiere emplearlos para evitar los "cabeceos" que someterían las palas a vibraciones perjudiciales. En el caso de palas a barlovento los sistemas de orientación son imprescindibles, por ello se utilizan colas de orientación en el caso de pequeños aerogeneradores o servomecanismos de orientación en el caso de los grandes.



*Imagen 2.16: Aerogeneradores con rotor a barlovento y a sotavento. Fuente: Diseño de pequeñas máquinas eólicas de baja potencia, Mario Rosato*

- **Aerogeneradores de eje vertical:**

Este tipo de aerogeneradores tiene la ventaja de que no necesitan sistemas de orientación. Esto es una gran ventaja, ya que no habría que diseñar ni fabricar estos mecanismos tan complejos de direccionamiento y se eliminarían los esfuerzos a los que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor. Así, por su disposición, hacen posible la colocación de los sistemas de conversión en el suelo, eliminando de esta forma pesadas cargas en las torres, algo que no se puede evitar en los de eje horizontal.

Dentro de los aerogeneradores de eje vertical existen dos diseños básicos: Savonius y Darrieus. Este proyecto está centrado en el rotor Savonius, debido a su sencillez en cuanto a técnicas de fabricación y a su bajo costo, aunque todo ello afecte a su eficiencia, haciendo que ésta no sea muy elevada. Este tipo de rotores suelen utilizarse en aplicaciones donde se requieren pequeñas potencias. En cuanto a los rotores Darrieus cada vez se están desarrollando más para la generación de electricidad, llegando incluso a competir con los de eje horizontal de palas aerodinámicas. Tienen un par de arranque nulo y entregan potencias altas por unidad de peso del rotor y por unidad de costo. La combinación de estos dos diseños de rotores ha dado lugar a un diseño de rotor Savonius con las palas torsionadas, para aumentar así su par de arranque.



*Imagen 2.17: Aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieux y tipo Savonius*

## 2.6 CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN ENERGÍA ELÉCTRICA

La conversión de la energía eólica en energía eléctrica se lleva a cabo de la siguiente manera.

La energía disponible en el viento es energía cinética, dicha energía es la que choca con las palas del rotor y estas palas la convierten en energía mecánica. El rotor se encuentra conectado al eje, y el par motor en dicho eje puede hacer trabajos mecánicos o generar electricidad.

Dependiendo del diseño aerodinámico de la pala, el viento, al actuar en las palas, produce un levantamiento o un arrastre. En el levantamiento lo que ocurre es que se produce una presión diferente en cada lado de la superficie del rotor, haciendo que el plano aerodinámico se levante. En el arrastre el viento golpea físicamente al rotor y lo arrastra con esa fuerza de choque. En cuanto a eficiencia se prefiere el levantamiento y las máquinas más modernas emplean este principio en su operación. Aun con todo, se sabe que por la Ley de Betz, como ya se ha explicado con anterioridad, solamente puede aprovecharse el 59,6% de la energía disponible del viento, ya que si fuera posible la extracción de toda la energía en movimiento del viento, justo detrás de las palas se quedaría una gran cantidad de aire en calma, por lo que bloquearía el acceso de más aire a las palas.

Una vez que ya se ha extraído la energía del viento, esta energía mecánica es convertida en energía eléctrica mediante un generador eléctrico, el cual puede ser de muy diversos tipos dependiendo de cómo sea el aerogenerador (según su potencia nominal, su uso, su posición,...). Por tanto, en esta conversión de energía mecánica a energía eléctrica también habrá unas determinadas pérdidas, las cuales también dependerán del tipo de generador seleccionado.

### 3. EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

A la hora de convertir la energía eólica en eléctrica no sólo hay que tener en cuenta los parámetros del aerogenerador, sino que como ya se ha comentado, también hay que considerar las características del viento (velocidad y densidad). Así, el lugar donde se coloca el aerogenerador es una decisión muy importante, por lo que antes de tomarla se deberá evaluar el recurso eólico en diferentes lugares para ver cual es el más adecuado para llevar a cabo la instalación.

Por ello, esta parte del proyecto dedicada a la evaluación del recurso eólico es de mucha importancia y todos los proyectos de generación eléctrica en base al uso de energía eólica realizan un estudio de este tipo.

La energía cinética del viento viene dada por la siguiente expresión:

$$P_v = 0,5\rho Av_v^3$$

Dónde:

$P_v$ : Potencia disponible del viento

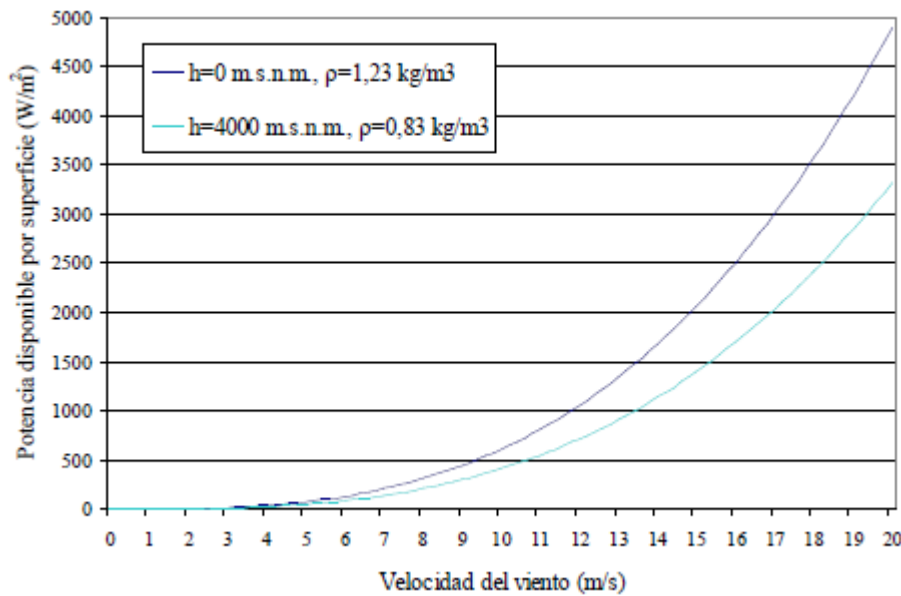
$\rho$ : Densidad del aire

A: Superficie considerada

$v_v$ : Velocidad del viento

En esta expresión se observa que la potencia disponible del viento es proporcional a la densidad del aire, a la superficie que se encuentra en contacto y al cubo de la velocidad del viento. Por lo tanto, y como ya se ha explicado con anterioridad, la velocidad será un aspecto muy importante a tener en cuenta, ya que una pequeña variación de ésta supone una gran variación en el potencial eólico. Por ello, a la hora de elegir el lugar de instalación del aerogenerador se tendrá que estudiar de manera minuciosa las condiciones meteorológicas, poniendo especial atención a la velocidad del viento.

La densidad también es un aspecto bastante importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar el emplazamiento para un proyecto. En la siguiente gráfica se muestra la relación existente entre potencia y densidad.



Gráfica 3.1: Potencia frente a velocidad de viento, para diferentes densidades de aire. Fuente: Estudio y desarrollo del Aerogenerador IT-PE-100, Pablo Paz

En el caso concreto de este proyecto, la densidad tendrá especial efecto sobre la potencia conseguida, ya que Bolivia al encontrarse a gran altura tendrá una densidad de aire menor, haciendo por tanto, disminuir la potencia del viento.

Para evaluar el recurso eólico en diferentes zonas es necesario realizar mediciones durante un periodo de tiempo lo suficientemente grande, como mínimo de una duración de un año.

Por ello, para la selección de la comunidad donde se va a llevar a cabo este proyecto se han tomado como datos mediciones que fueron realizadas por el Centro de Información de Energías Renovables (CINER) con anemómetros colocados a una altura de 10 metros en las poblaciones de Challapata, Iruni y Vilacollo.

Así, se explicarán también los diferentes aspectos a tener en cuenta a la hora de instalar dichos anemómetros, de realizar mediciones y de recopilar datos.





Imagen 3.1: Ubicación de Challapata, Iruni y Vilacollo. Fuente: Google Earth

Si comparamos los resultados de viento con los datos del Atlas eólico de Bolivia, se puede observar que hay zonas con un mayor potencial eólico. Sin embargo, este proyecto está centrado en esta zona debido a las necesidades humanas que había en cuanto a utilización de la electricidad. Por tanto, se intentará seleccionar la comunidad dentro de la zona que tenga el mejor potencial eólico.

### 3.2 SELECCIÓN DE LAS COMUNIDADES CANDIDATAS PARA REALIZAR MEDICIONES

A la hora de seleccionar una comunidad para hacer la instalación de aerogeneradores de baja potencia para electrificación hay que tener en cuenta una serie de aspectos.

El acceso a dicha comunidad tiene que ser posible tanto para las personas como para las máquinas y los materiales necesarios para llevar a cabo la instalación. Además, hay que asegurarse de que la red eléctrica no alimente esa comunidad y de que ésta no entre dentro de los planes de electrificación del país, ya que sería una pérdida de tiempo y de recursos instalar un equipo de baja potencia y que poco tiempo después la red eléctrica llegue hasta dicha comunidad.

Otro tema a tener en cuenta es la dispersión de las familias, ya que en esta zona de Bolivia las comunidades no solamente se encuentran alejadas unas de otras, sino que dentro de una misma comunidad hay mucha dispersión. Por tanto, a la hora de estudiar la demanda energética habrá que considerar si dentro de una comunidad hay diversos bloques dispersos.

Por último, como ya se ha comentado hay que considerar el recurso eólico en la zona, para ver si con el viento disponible resulta rentable la instalación del equipo.

En este caso, las comunidades seleccionadas han sido Challapata, Iruni y Vilacollo, ya que más o menos cumplen con los requisitos anteriores y además se tienen una serie de datos gracias a las mediciones que realizó CINER durante aproximadamente un año en estos lugares.

Comunidad	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.n.m)	Densidad del aire [Kg/m <sup>3</sup> ]
Vilacollo	68°45,93 O	18°30,38 S	3851	0,84
Iruni	68°31,96 O	18°36,24 S	3922	0,83
Challapata	66°27,38 O	19°11,54 S	4457	0,78

*Tabla 3.1: Ubicación comunidades seleccionadas. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia*

Comunidad	Comienzo recogida datos	Fin recogida datos
Vilacollo	Noviembre 2008	Octubre 2009
Iruni	Noviembre 2008	Octubre 2009
Challapata	Febrero 2009	Octubre 2009

*Tabla 3.2: Tiempo de obtención de datos por comunidad. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia*

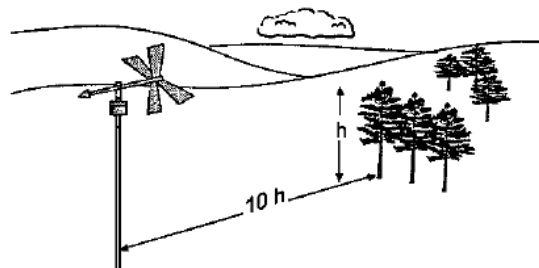
Lo comentado anteriormente sobre la densidad, se corrobora en estas tablas. Se observa que la densidad de viento en estas comunidades es bastante baja, alrededor de 0,83kg/m<sup>3</sup>, frente a los 1,23kg/m<sup>3</sup> que se tienen a nivel del mar. Por ello, la densidad energética del viento será también menor.

### 3.3 INSTALACIÓN DE ANEMÓMETROS Y TOMA DE MEDIDAS

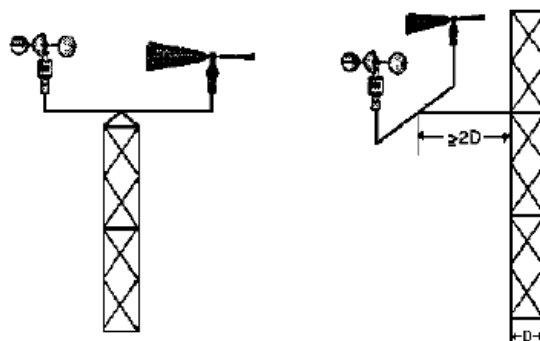
En la instalación de anemómetros se colocó un anemómetro en cada una de las comunidades seleccionadas (Challapata, Iruni y Vilacollo).

Si se quieren obtener unos datos de viento fiables la colocación de los anemómetros tiene que estar muy bien estudiada y aunque sea complicado o peligroso el acceso a dicho lugar habrá que intentar que la colocación de estos instrumentos sea lo más adecuada posible. Para la instalación de los anemómetros se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos, ya comentados en apartados anteriores sobre la importancia de la ubicación de los aparatos de medida:

- La altura de la colocación de los instrumentos será de 10 metros sobre el suelo.
- La distancia existente entre el instrumento y cualquier obstrucción (árboles, edificios,...) debe ser como mínimo de 10 veces la altura de dicha obstrucción.
- Las torres donde se colocan los instrumentos para llevar a cabo las mediciones es preferible que sean de rejillas para que influyan lo mínimo posible en los resultados. Además, deben ubicarse en la parte superior de la torre y si esto no fuera posible y tuvieran que colocarse a un lado de la torre deberá colocarse extendido hacia afuera a una distancia de al menos dos veces el diámetro de la torre en dirección del viento.



*Imagen 3.2: Distancia entre el aparato de medida y los obstáculos. Fuente: energía eólica, Miguel Villarrubia*



*Imagen 3.3: Ubicación del anemómetro en caso de ser montado en una torre. a) En la parte superior de una torre. b) A un lado de la torre. Fuente: energía eólica, Miguel Villarrubia*



*Imagen 3.4: Instalación de anemómetros en Iruni. Fuente: CINER*

### 3.4 RECOPIACIÓN DE DATOS

La recopilación de datos se realiza mediante un Data Logger, es decir, mediante un almacenador de datos. Este elemento deberá estar a una altura adecuada y de fácil acceso para que el técnico encargado pueda descargar los datos sin ningún problema ni riesgo para él ni para el equipo.

En las siguientes figuras se muestra el trabajo de los técnicos recopilando los datos del viento.



*Imagen 3.5: Recopilación de datos en Iruni. Fuente: CINER*

### 3.5 EVALUACIÓN DE LOS DATOS: GRÁFICOS Y DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA

Una vez que ya se han obtenido los datos en el Data Logger, éstos se organizan en tablas y gráficas por meses para de esta forma tener una idea del potencial de viento que hay en cada zona.

A continuación se muestran las tablas y gráficas de las velocidades medias mensuales de las comunidades de Challapata, Iruni y Vilacollo.

Año	Mes	Velocidad promedio mensual m/s	Densidad aire
2009	Febrero	2,90	0,78
2009	Marzo	2,70	0,78
2009	Abril	2,59	0,78
2009	Mayo	2,77	0,78
2009	Junio	2,97	0,78
2009	Julio	4,07	0,78
2009	Agosto	3,19	0,78
2009	Septiembre	4,18	0,78
2009	Octubre	3,33	0,78
PROMEDIO		3,19	

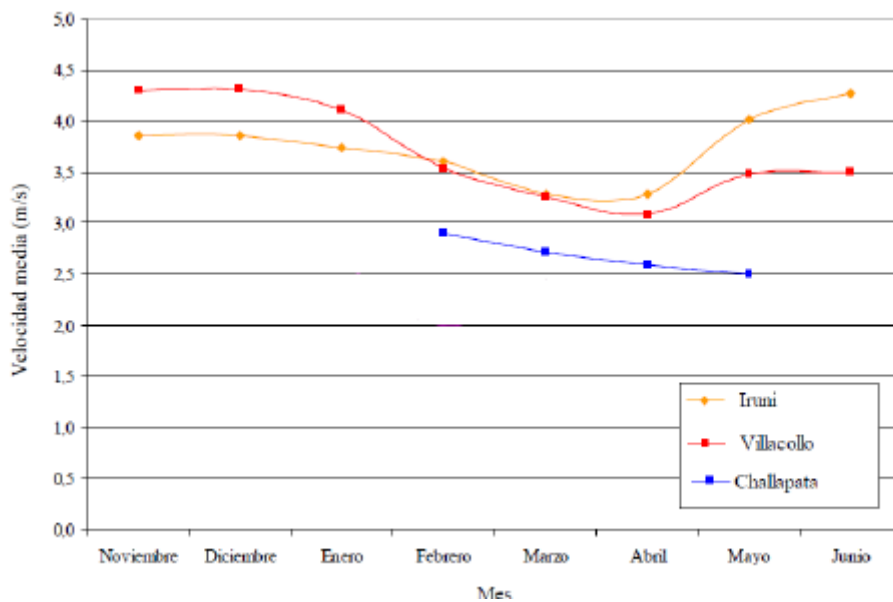
*Tabla 3.3: Velocidades promedio mensuales de Challapata. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia*

Año	Mes	Velocidad promedio mensual m/s	Densidad aire
2008	Noviembre	3,85	0,83
2008	Diciembre	3,85	0,83
2009	Enero	3,74	0,83
2009	Febrero	3,61	0,83
2009	Marzo	3,28	0,83
2009	Abril	3,29	0,83
2009	Mayo	4,01	0,83
2009	Junio	4,27	0,83
2009	Julio	5,16	0,83
2009	Agosto	4,32	0,83
2009	Septiembre	5,22	0,83
2009	Octubre	5,22	0,83
PROMEDIO		4,15	

*Tabla 3.4: Velocidades promedio mensuales de Iruni. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia*

Año	Mes	Velocidad promedio mensual m/s	Densidad aire
2008	Noviembre	4,30	0,84
2008	Diciembre	4,31	0,84
2009	Enero	4,11	0,84
2009	Febrero	3,54	0,84
2009	Marzo	3,26	0,84
2009	Abril	3,09	0,84
2009	Mayo	3,49	0,84
2009	Junio	3,50	0,84
2009	Julio	4,92	0,84
2009	Agosto	3,86	0,84
2009	Septiembre	5,25	0,84
2009	Octubre	4,44	0,84
PROMEDIO		4,01	

Tabla 3.5: Velocidades promedio mensuales de Vilacollo. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia



Gráfica 3.2: Velocidades de viento. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia

### 3.5.1 Perfiles diarios y distribuciones Weibull

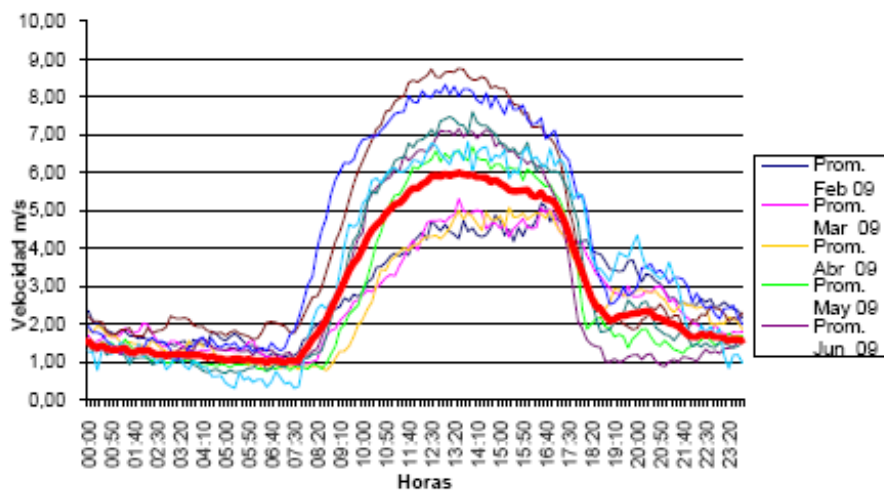
Una vez que se tienen los datos recopilados se pueden elaborar diferentes tipos de gráficas.

El perfil diario refleja la variación de la velocidad media del viento a lo largo de un día. Para hallar la velocidad media a una hora determinada se halla la media de todos los datos correspondientes a esa hora a lo largo de cada uno de los meses. Realizando esto para todas las horas se obtiene la curva del perfil diario.

Mediante la distribución Weibull correspondiente se representa la probabilidad de que se dé una velocidad de viento determinada. Como ya ha comentado en apartados anteriores, se trata de una expresión estadística que al variar determinados factores conocidos como factor de forma y de escala, consigue reflejar y ajustarse a los datos reales de viento de un emplazamiento correspondiente cuando se trata de mediciones en periodos no muy cortos.

A continuación se muestran las distribuciones Weibull para las tres comunidades. Para la realización de estas gráficas se ha utilizado la herramienta disponible en internet en *The Swiss Wind Power Data Website*. Mediante esta herramienta, al introducir los porcentajes de tiempo que sopla el viento a cada velocidad, se obtiene la distribución Weibull con sus correspondientes factores de forma y escala, así como con la velocidad media.

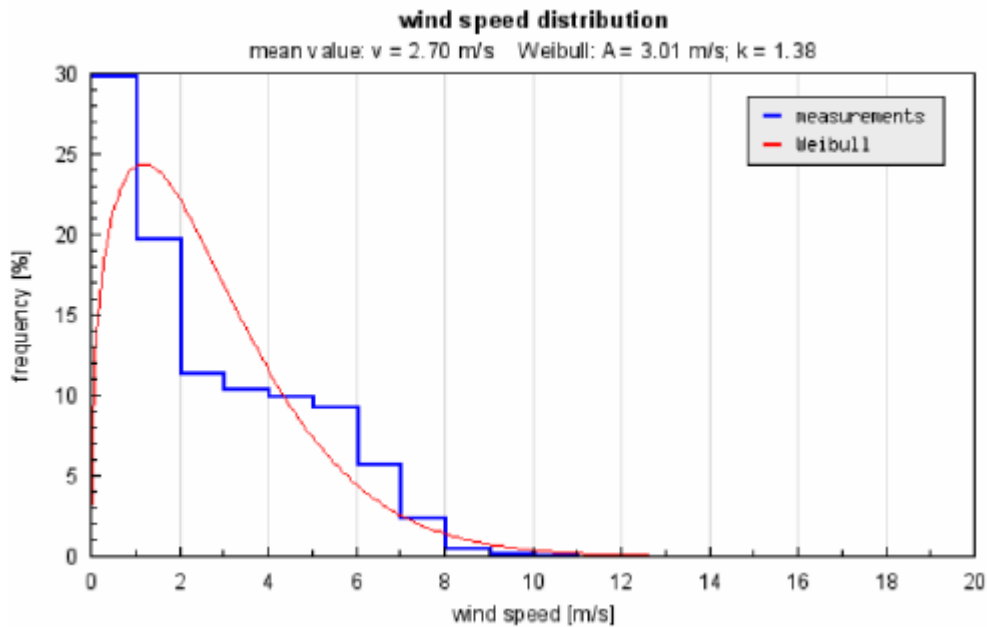
#### Challapata



Gráfica 3.3: Perfil de vientos diario en Challapata. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia



El perfil de vientos diario de Challapata muestra que los vientos son muy bajos desde las 21 horas hasta las 9 horas, y de 10 a 18 horas hay una “meseta” de vientos constantes alrededor de 5 m/s. Además, se ve que hay una cantidad mayor de 6 horas con velocidades mayores de 3m/s.

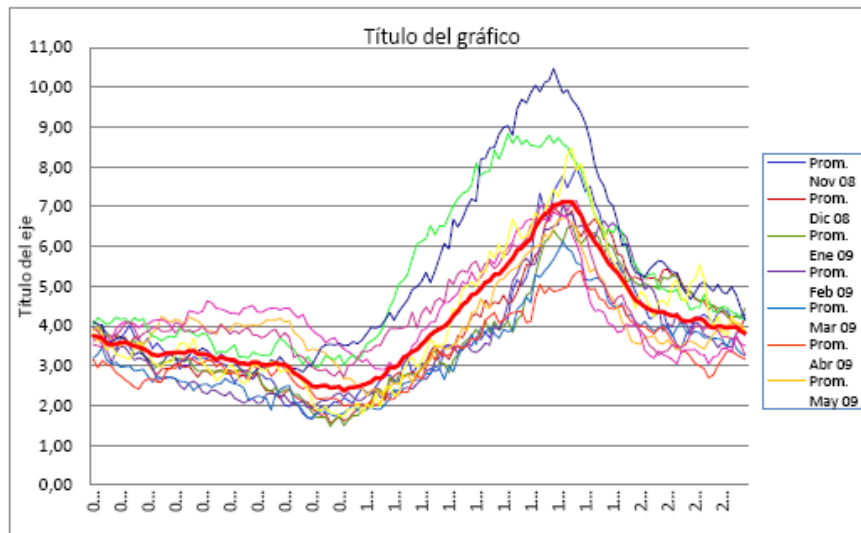


Gráfica 3.4: Distribución Weibull en Challapata. Fuente: elaboración propia.

Casi un tercio del tiempo (30%) la velocidad del viento es menor de 1 m/s, mientras que vientos mayores de 7 m/s suponen sólo un 4%. El intervalo comprendido entre 3 y 6 m/s supone un 35% de las velocidades.

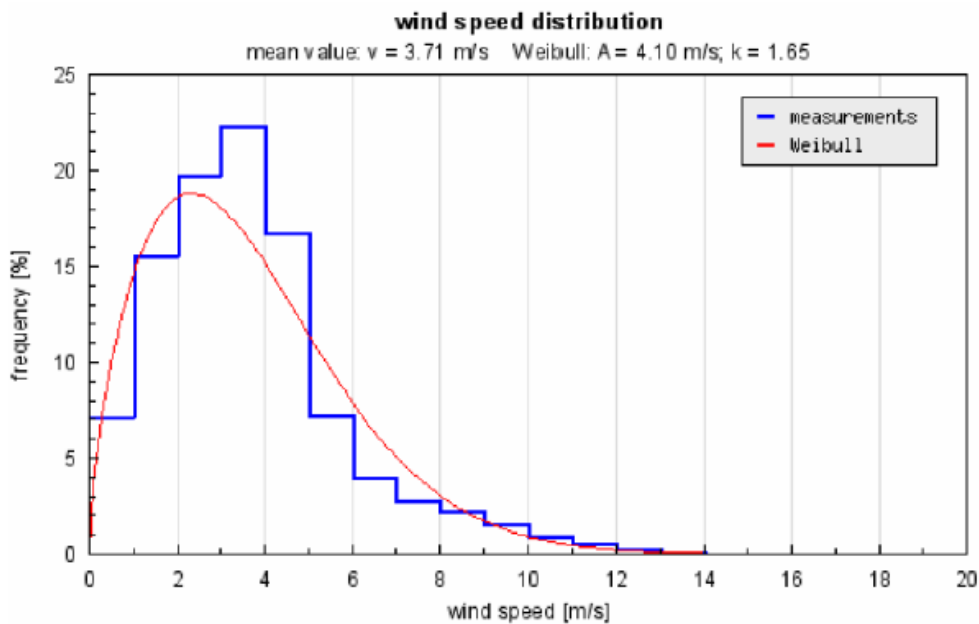
La curva Weibull resultante tiene un factor de escala de  $c=3,01$  y un factor de forma de  $k=1,38$ . Se ajusta bien para velocidades de 1 o 2 m/s y de 3 a 5 m/s. Sin embargo, para velocidades entre 5 y 7m/s se encuentra por debajo de las frecuencias, por lo que quizá se esta subestimando la producción.

Iruni



Gráfica 3.5: Perfil de vientos diarios en Iruni. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia

En el perfil diario de vientos de Iruni se observa que los vientos son suaves por la mañana y van aumentando a lo largo del día hasta llegar al máximo alrededor de las 5 o 6 de la tarde, cuando empiezan a decaer de nuevo. Hay vientos superiores a 3m/s durante más de 18 horas al día.

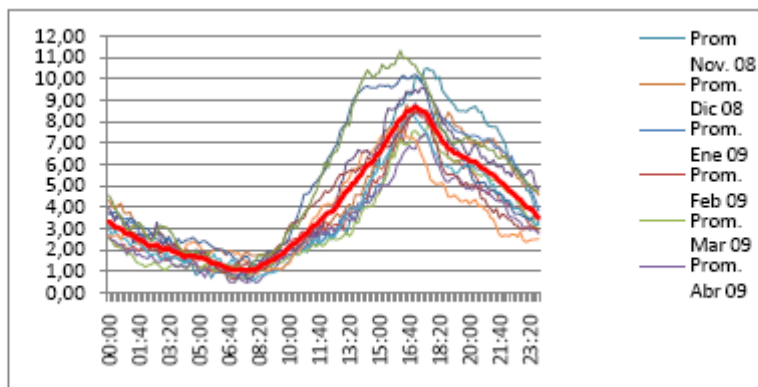


Gráfica 3.6: Distribución Weibull en Iruni. Fuente: Elaboración propia

En las columnas azules, que reflejan los datos introducidos, se observa que la mayor parte de los datos recogidos pertenecen al intervalo de velocidades entre 2 y 4 m/s, siendo 3 m/s la más repetida, con un 22% de frecuencia. En cambio, las velocidades superiores a 7 m/s sólo suponen el 8,5% de los datos recogidos.

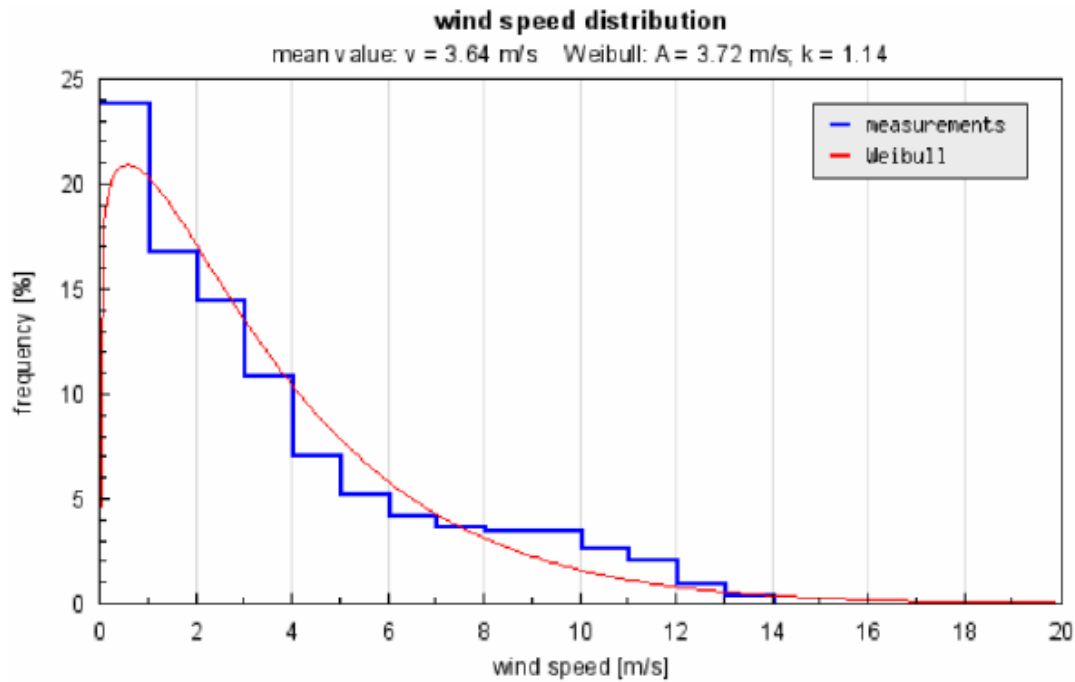
La velocidad media es de 3,71 m/s, baja para un aprovechamiento a gran escala del potencial eólico, pero suficiente para aplicaciones domésticas. Se tiene un factor de escala de  $c=4,10$  y un factor de forma de  $k=1,65$ . Esta distribución Weibull se ajusta bastante bien a los datos reales, excepto en las velocidades de viento entre 3 y 5m/s, en las cuales la curva se queda un poco por debajo de la realidad.

*Vilacollo*



*Gráfica 3.7: Perfiles de vientos diario en Vilacollo. Fuente: Proyecto de Mejora del acceso de la energía en las comunidades rurales de Bolivia*

El perfil de vientos diario de Vilacollo es similar al de Iruni pero con una variación más fuerte a lo largo del día. A primeras horas del día la velocidad desciende hasta 1 m/s, y luego va en aumento hasta las 5 o 6 de la tarde cuando se alcanzan valores cercanos a los 8 m/s. Hay menos horas con vientos mayores a 3 m/s (unas 16), pero en estas horas el viento es más intenso que en Iruni.



Gráfica 3.8: distribución Weibull en Vilacollo. Fuente: elaboración propia

Los vientos en Vilacollo tienen frecuentemente (casi 24%) velocidades menores de 1 m/s. Por el contrario, también son más frecuentes que en Iruni vientos mayores de 7 m/s (17%).

La distribución Weibull tiene un factor de escala de  $c=3,72$  y un factor de forma de  $k=1,14$ . Ésta se ajusta bastante bien a los datos recogidos, excepto quizás a la izquierda de la tabla, lo cual no tiene importancia porque es una zona en la que el aerogenerador no produce energía.

Para la realización de este proyecto se va a seleccionar la comunidad de Vilacollo, ya que aunque tiene un porcentaje elevado de vientos suaves, la frecuencia de vientos fuertes es mayor que en el caso de las otras dos comunidades. Además, como el equipo se trata de un aerogenerador Savonius, el cual arranca con poca velocidad, el hecho de que haya bastantes vientos suaves no será un problema a considerar.

## 4. INFORMACIÓN SOBRE LA ZONA DEL PROYECTO

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto tiene por objeto el diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación de comunidades rurales. Aunque en principio dicho aerogenerador puede ser diseñado para cubrir las necesidades energéticas de cualquier comunidad rural, en este caso se va a tomar como modelo una de las comunidades anteriores sobre las que se realizó el estudio del recurso eólico.

Como ya se explicó, se ha tomado la comunidad de Villacollo, ya que según el perfil diario de viento es la comunidad que mejor se ajusta a los requisitos de viento necesarios para un mejor funcionamiento de un aerogenerador de este tipo.

Para realizar el dimensionamiento del aerogenerador se tendrá en cuenta la dispersión de la comunidad donde va a instalarse, así como el número de familias que reside en cada bloque disperso y la demanda energética que tiene cada familia. Gracias a CINER, se tienen unos datos bastante fiables sobre la comunidad de Vilacollo.

### 4.2 UBICACIÓN DE LA POBLACIÓN DE VILACOLLO

La comunidad de Vilacollo se encuentra situada en las siguientes coordenadas: longitud: 68°45,93 O, latitud: 18°30,38 S, altitud: 3851m.s.n.m.

Está ubicada en la parte oeste de Bolivia, concretamente en el departamento de Oruro.



Imagen 4.1: Mapa de Bolivia por departamentos. Fuente: fundacionpueblo.org



Imagen 4.2: Localización de Vilacollo. Fuente: Google Earth

### 4.3 CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN

#### 4.3.1 Características de la población actual

Los datos disponibles sobre las características de la población de esta comunidad están referidos al año 2011, por lo que van a considerarse válidos para tomarlos en cuenta a la hora de realizar el proyecto, ya que son suficientemente cercanos en el tiempo.

En 2011 Vilacollo contaba con una población de 298 habitantes, distribuidos en 52 familias. Hay que tener en cuenta que dichas familias no se encuentran unas cerca de otras, sino que la distancia entre ellas puede llegar incluso a los 7 km. Este dato ya se había comentado ya que es de gran importancia a la hora de llevar a cabo la instalación de los aerogeneradores. Además, las familias se encuentran más o menos distribuidas de manera más cercana en tres bloques: el primero cuenta con 14 familias, el segundo con 18 y el último cuenta con 20

#### 4.3.2 Características de la población futura

Como se ha comentado, los datos conocidos sobre la población son datos actuales. Sin embargo, el proyecto a realizar está pensado para que pueda cubrir las necesidades energéticas de la población durante al menos un periodo de 10 años.

Por ello, será necesario calcular la población que habrá en un futuro. De esta forma, se hará una estimación de lo que será en ese momento la demanda energética y así se podrá verificar si con la instalación realizada ahora se seguirán cubriendo las necesidades energéticas de dentro de 10 años.

Para el cálculo de la población futura se utilizará la siguiente fórmula:

$$P_f = P_a \left(1 + \frac{i}{100}\right)^t$$

Donde

$P_f$ : Población futura

$P_a$ : Población actual

$i$ : tasa de crecimiento

$t$ : periodo de crecimiento

En este caso

$P_a = 298$  habitantes

$i = 1,7\%$  (dato tomado del Instituto Nacional Estadístico de Bolivia)

$t = 10$  años

Por tanto, la población estimada en 10 años será de 353 habitantes, distribuida en 62 familias. En este caso se seguirán suponiendo que hay 3 bloques de familias que están más unidos que con el resto. El número de familias que se estima que habrá en estos bloques será 17, 21 y 24.

#### 4.4. ESTUDIO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

Para la realización de este estudio se va a partir de la demanda máxima de los consumidores, teniendo en cuenta la potencia instalada, así como los factores de demanda, de simultaneidad y de utilización.

Además, se distinguirá entre categoría residencial, que considerará a las familias, y categoría general, en el que se incluirá un hospital y una pequeña escuela. No se va a considerar el alumbrado público en este caso, ya que las casas se encuentran bastante alejadas unas de otras y por tanto, éste resultaría muy costoso.

Los datos que se recogen sobre los consumos energéticos tanto familiares como generales están tomados de una serie de encuestas que se realizaron no exactamente en Vilacollo pero sí en comunidades cercanas con unas características en cuanto a población similares.

Los resultados de dichas encuestas ponen de manifiesto que en estas comunidades el consumo energético no es comparable con el de las ciudades electrificadas. La energía se utiliza sobretodo para la iluminación y calefacción de las casas y para la cocción de los alimentos. Para ello, las fuentes energéticas que se utilizan son el carbón, las velas, los mecheros de keroseno y también las linternas a pilas.

Fuente	Cantidad/mes	Bs/mes (€/mes)
Carbón	4Kg	20 (2,3€)
Velas	6 unidades	3 (0,34€)
Keroseno	2 litros	10 (1,1€)
Pilas	4 unidades	6 (0,68€)
<b>Total</b>		<b>39 (4,42)</b>

Tabla 4.1: consumo energético promedio por familia. Fuente: Cidar Oliva, en base a encuestas realizadas en otras comunidades similares.

Para entender de manera más clara cual es esta demanda energética de las familias lo que se utiliza es un factor de conversión establecido por el Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (VMEEA). Este factor transforma el consumo energético tradicional en consumo energético eléctrico.

Fuente	Carbón (Kg)	Velas (unidad)	Keroseno (L)	Pilas (unidad)
Equivalente unitario de energía eléctrica (kWh/unidad)	4,07	0,045	0,8	0,056

Tabla 4.2: Factores de conversión de energéticos tradicionales a energía eléctrica. Fuente: Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (VMEEA)



Con estos factores de conversión, el consumo energético de cada familia quedaría de la siguiente forma.

Fuente	Cantidad/mes	Factor equivalente	Total (kWh)
Carbón	4Kg	4,07	16,28
Velas	6 unidades	0,045	0,27
Keroseno	2 litros	0,8	1,6
Pilas	4 unidades	0,056	0,224
<b>Total</b>			<b>18,374</b>

*Tabla 4.3: Consumo energético mensual por familia. Fuente: elaboración propia*

Como ya se ha comentado con anterioridad y como se observa también en esta tabla, el consumo de cada familia es pequeño, por lo que con la instalación que se pretende realizar, se cubrirá toda la demanda energética.

En este proyecto, cada aerogenerador puede proporcionar una potencia máxima de 100W, que aproximadamente servirá para cubrir la demanda de entre 2 y 3 familias. Para calcular de manera más exacta el número de aerogeneradores que serán necesarios en cada bloque de familias para cubrir la demanda energética, se calcularán los kWh que con ese determinado viento pueden ser producidos por cada equipo y éstos se compararán con los kWh que consume cada familia. Estos cálculos se pueden observar en el ANEXO 1.

#### 4.4.1 Categoría residencial

Esta categoría incluye el consumo energético de las 52 familias de la población de Vilacollo. Para todos los cálculos realizados se ha tenido en cuenta la distribución de estas familias en los tres bloques de 14, 18 y 20 familias respectivamente.

Como se ha explicado con anterioridad, aunque las familias dispongan de otras fuentes energéticas diferentes a las que utilizan normalmente, el consumo energético de éstas no va a ser comparable con el de las poblaciones de ciudades electrificadas. Por sus propias costumbres este consumo va a seguir siendo mucho menor y se va a reducir casi exclusivamente al uso de electricidad para iluminación y para el uso de pequeños electrodomésticos como la radio y la televisión.

Así, dentro de las familias se van a tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Cada familia contará con dos puntos de luz para bombillas de bajo consumo (20W/bombilla).
- Dos tomas de corriente para utilización de pequeños electrodomésticos como televisión y radio (20W/televisión, 60W/radio).

En total, la cantidad de Watios instalados es pequeña, por lo que según el Reglamento para Instalaciones Eléctricas de Baja tensión, el factor de demanda del proyecto será considerado como uno.

Potencia instalada	Factor de demanda
Los primeros 3000W	1
De 3001W a 8000W	0,35
A partir de 8000W	0,25

*Tabla 4.4: Factores de demanda. Fuente: Reglamento para Instalaciones Eléctricas interiores en Baja Tensión.*

Además, inicialmente la cobertura de la red será del 70%. Así, en cuanto a iluminación todas las familias utilizarán desde el comienzo del proyecto los dos puntos para bombillas de bajo consumo, sin embargo, para el uso de televisión y radio esto no será así. Inicialmente solamente un 25% de las familias contará con un aparato de radio y un 10% con uno de televisión. Por lo que los factores de utilización serán:

- Factor de utilización iluminación: 1
- Factor de utilización radio: 0,25
- Factor de utilización televisión: 0,1

Otro aspecto a considerar será la simultaneidad con la que trabajan los equipos, ya que habrá momentos en los que habrá muchos equipos trabajando a la vez y otros momentos en los que solamente trabajen unos pocos. Para ello utilizaremos el factor de simultaneidad, el cual se considera diferente en el caso en el que sea de día y de noche. Los valores han sido tomados considerando un poco la siguiente tabla, pero siempre pensando en el caso concreto de la comunidad de Vilacollo y como sus habitantes van a hacer uso de la energía.

Nº familias	Factor simultaneidad (consumo mínimo y medio)	Factor de simultaneidad (consumo elevado)
2-4	1	0,8
5-10	0,8	0,7
11-20	0,6	0,5
21-30	0,4	0,3

*Tabla 4.5: Factor de simultaneidad correspondiente a un conjunto de viviendas. Fuente: Disposiciones técnicas para instalaciones eléctricas de baja y media tensión (1/12/2004)*

Los valores que finalmente se consideran para este proyecto son:

- Factor de simultaneidad iluminación: 0,1 (día) / 0,9 (noche)
- Factor de simultaneidad radio: 0,5 (día) / 0,7 (noche)
- Factor de simultaneidad televisión: 0,2 (día) / 0,8 (noche)

#### 4.4.2 Categoría general

Esta categoría incluye un hospital y una escuela, ambos de tamaño reducido para poder cumplir con las necesidades básicas de sanidad y de educación.

##### *Hospital*

El hospital estará formado por una sala de consultas y una sala de espera, para utilizar en el caso que sea necesario. Así, las instalaciones con las que contará dicho hospital serán:

- Dos puntos de luz, uno para la sala de consultas y otro para la de espera. En estos se utilizarán bombillas de bajo consumo (20W/bombilla).
- Dos tomas de corriente. Una será utilizada para el aparato de radio que mantendrá en contacto al hospital con el resto de la comunidad y la otra para una nevera que servirá para mantener refrigeradas las vacunas necesarias.

El factor de demanda, como para el resto de la instalación también será considerado uno.

En este caso, al contar sólo con un hospital la cobertura de red para éste será total, por lo que los factores de utilización tanto de la iluminación como de la radio y la nevera tendrán valor uno.

En cuanto al factor de simultaneidad de la radio y la nevera al haber sólo un equipo, será uno y en cuanto a la iluminación se pondrá un valor de 0,8, pues en la mayoría de casos ambas salas estarán iluminadas de forma simultánea pero quizá hay momentos en los que sólo está iluminada una de las salas. En este caso dichos valores de factor de simultaneidad servirán tanto para el día como para la noche.

##### *Escuela*

La escuela estará formada por cuatro aulas, cada una de las cuales contará con un punto de luz para bombilla de bajo consumo (20W/bombilla).

Al igual que ocurría con el hospital, en este caso el factor de demanda será igual a uno y en cuanto al factor de utilización, tampoco se tendrá en cuenta la cobertura de la red, ya que la comunidad solamente cuenta con una escuela. Por tanto, el valor de éste también será uno.

Para el factor de simultaneidad al contar con cuatro aulas, se considerará un valor de 0,8, ya que en la mayoría de ocasiones las cuatro aulas trabajarán de forma simultánea aunque pueda suceder que a veces no sea así.

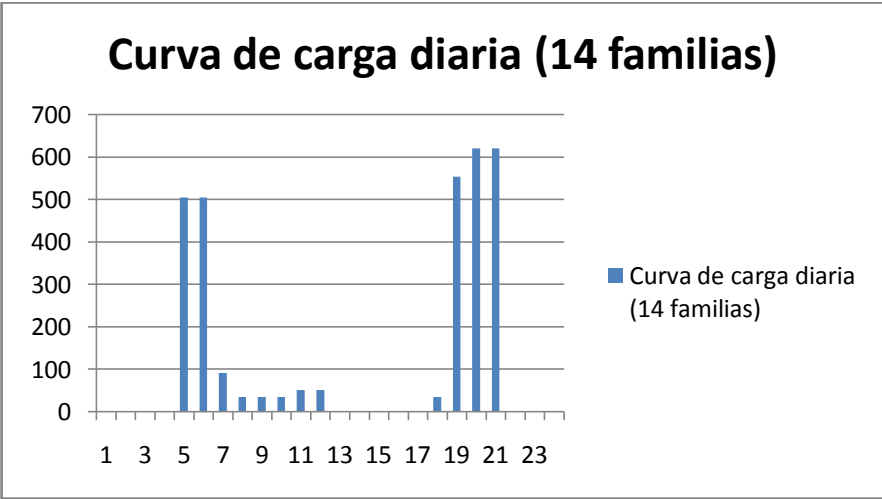
A continuación se muestran unas tablas con los valores de la potencia demandada por la comunidad. En primer lugar se hallará la potencia necesaria para la categoría residencial, luego para la categoría general y finalmente se hallará el total de la potencia necesaria.

Como la comunidad está dividida en tres bloques, se hallará también la potencia que demanda cada uno de los bloques. Teniendo en este caso solamente en cuenta la categoría residencial.



Bloque 14 familias

AÑO CERO CATEGORÍA RESIDENCIAL 14 FAMILIAS																																		
Descripción	Usuarios potenciales	Pot inst (W)	Fact utilizac	Fact simultaneidad		Tiempo utilización (h)	Horas																											
				Día	Noche		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
Iluminación	14	40	1	0,1	0,9	6					504	504	56															504	504	504				
Radio	14	20	0,25	0,5	0,7	10								35	35	35	35	35	35									35	49	49	49			
Televisión	14	60	0,1	0,2	0,8	4														16,8	16,8													
<b>Total categoría residencial</b>		120					0	0	0	0	504	504	91	35	35	35	51,8	51,8	0	0	0	0	0	0	0	0	35	553	620,2	620,2	0	0	0	



Gráfica 4.2: Curva de carga diaria del bloque de 14 familias



A partir de las tablas anteriores en las que se tenían datos de potencia, se calcula la energía en kWh que necesitaría cada uno de los bloques de familias durante un año.

Así, de dichas tablas se obtienen los siguientes datos:

Número de familias/bloque	Energía demandada (kWh/día)
14 familias	3,136
18 familias	4,032
20 familias	4,480

*Tabla 4.6: Energía demandada por cada bloque de familias*

Este valor se utiliza en el ANEXO 1 para hallar el número de aerogeneradores necesarios para cubrir la demanda.

Como se comentó con anterioridad, este proyecto se desea que sea válido para un periodo de tiempo mínimo de 10 años. Por lo que a continuación se va a realizar una estimación de la demanda energética que Vilacollo tendrá en ese momento.

La población en 2022 habrá crecido de la forma que se calculó en el apartado anterior, siendo ésta de 353 habitantes, distribuidos en 62 familias que a su vez están organizadas en 3 bloques de 17, 21 y 24 familias cada uno.

Además, en este periodo de tiempo se quiere que la cobertura de red aumente, por lo que aumentarán tanto el factor de utilización de la televisión como el de la radio, y como consecuencia los factores de simultaneidad de éstos también variarán. Así, se van a considerar los siguientes datos:

- Factor de utilización radio: 0,4
- Factor de utilización televisión: 0,25
- Factor de simultaneidad radio: 0,4 (día) / 0,6 (noche)
- Factor de simultaneidad televisión: 0,2 (día) / 0,7 (noche)

En el caso de la categoría general (hospital y escuela) los datos van a mantenerse iguales que los del año inicial.

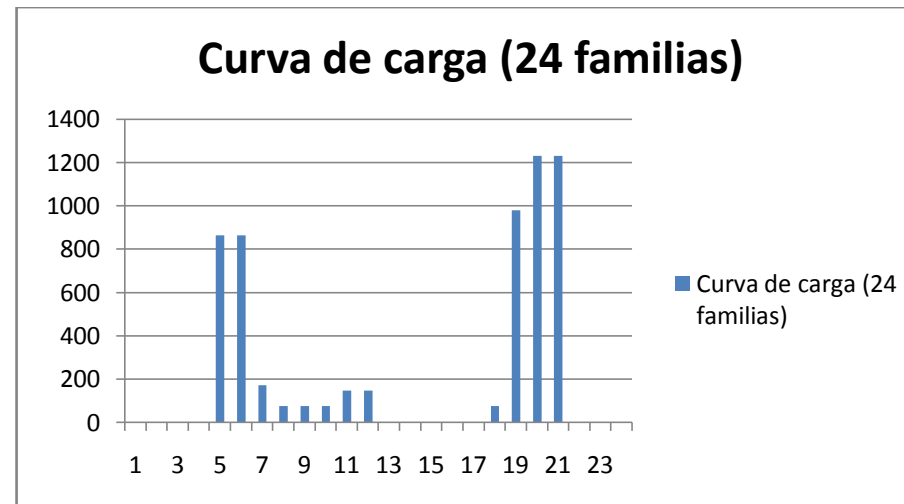






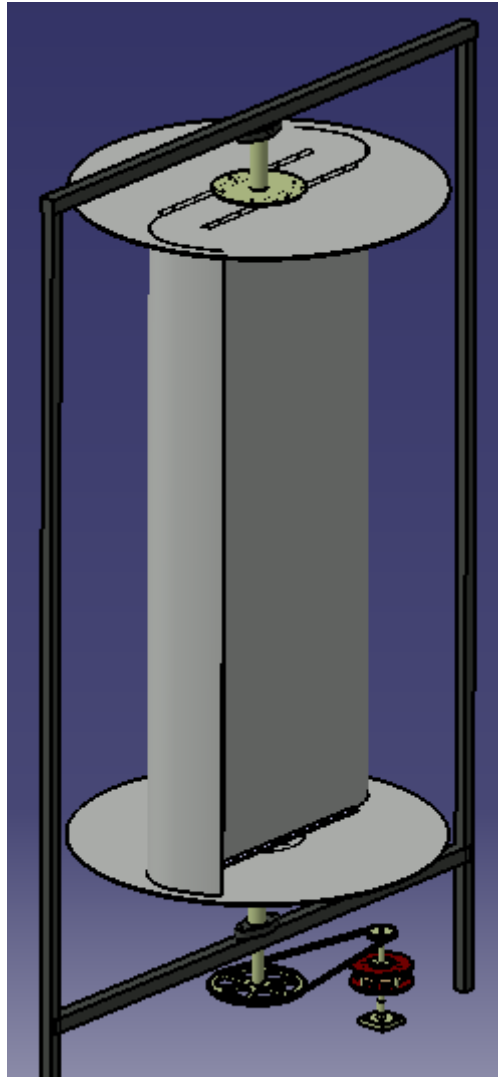
*Bloque 24 familias*

AÑO DIEZ CATEGORÍA RESIDENCIAL 24 FAMILIAS																																		
Descripción	Usuarios	Pot inst (W)	Fact utilizac	Fact simultaneidad	Día	Noche	Tiempo utilización (h)	Horas																										
								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
Iuminación	24	40	1	0,1	0,9	6					864	864	96														864	864	864					
Radio	24	20	0,4	0,4	0,6	10							76,8	76,8	76,8	76,8	76,8	76,8									76,8	115,2	115,2	115,2				
Televisión	24	60	0,25	0,2	0,7	4														72	72									252	252			
<b>Total categoría residencial</b>		120						0	0	0	0	864	864	172,8	76,8	76,8	76,8	148,8	148,8	0	0	0	0	0	0	0	76,8	979,2	1231,2	1231,2	0	0	0	



Gráfica 4.6: Curva diaria de carga del bloque de 24 familias

## 5. DISEÑO DEL AEROGENERADOR SAVONIUS DE 100W



*Imagen 5.1: Diseño del aerogenerador. Fuente: elaboración propia*

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar el diseño del aerogenerador se deben identificar las condiciones externas e internas en las que va a trabajar éste. Por ello, este capítulo va a servir como marco de referencia al siguiente capítulo que trata sobre la ingeniería de proyecto, en el cual se va a realizar el cálculo y dimensionamiento del aerogenerador y todos sus componentes.

En el estudio de las condiciones externas se considerarán todas las condiciones que no tienen una relación directa con la máquina y su fabricación. En estas condiciones se pueden considerar la temperatura exterior, la densidad del aire, las condiciones del suelo, la altitud, la velocidad promedio del viento,... Todas ellas no son constantes y deben ser tenidas en cuenta para el diseño final del equipo.

En el estudio de las condiciones internas se considerarán todas las condiciones que están relacionadas con la máquina, es decir, características propias del equipo como podría ser el diseño de las palas, el sistema de transmisión, el generador eléctrico,...

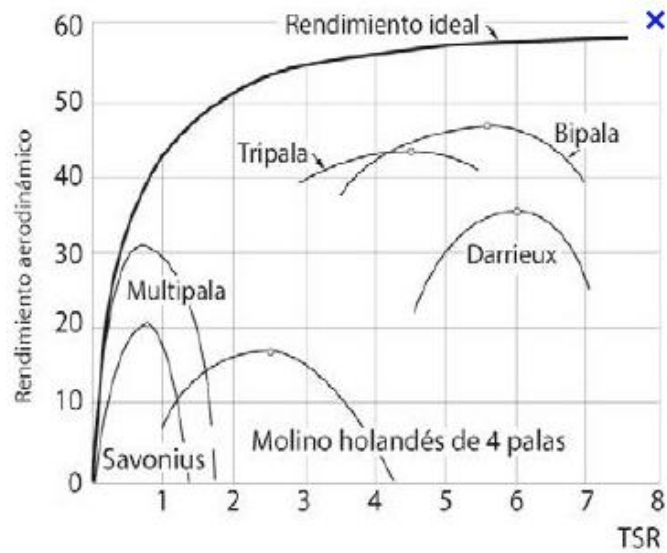
Por lo tanto, el estudio de todas estas características será necesario para poder determinar las condiciones de diseño y el dimensionamiento del equipo.

## 5.2. ¿POR QUÉ DISEÑAR UN AEROGENERADOR SAVONIUS?

Los aerogeneradores de eje vertical no son muy comunes ya que tienen una eficiencia menor que los de eje horizontal. Sin embargo, en el caso de electrificación rural se busca más la sencillez tanto en diseño, fabricación, montaje y mantenimiento, que la eficiencia.

El hecho de diseñar un aerogenerador Savonius se debe a que dentro de los aerogeneradores de eje vertical se trata del más sencillo en fabricación e instalación. Así, necesita un mantenimiento mínimo, tiene un coste bajo, consigue arrancar con poco viento y no necesita de un sistema de orientación del viento, ya que funciona con vientos de cualquier dirección.

Sin embargo, también tiene inconvenientes como el hecho de que gira a una velocidad muy pequeña, por lo que a veces necesitará de sistemas de transmisión. No obstante el mayor inconveniente que tiene es que su rendimiento también es de los más bajos en cuanto a aerogeneradores de eje vertical.



Gráfica 5.1: Coeficiente de eficiencia del rotor ( $C_p$ ) con base a la relación de la velocidad en punta de pala. Fuente: Energía Eólica, Fernández, 2009.

Por todo ello, los aerogeneradores de tipo Savonius se utilizaban normalmente para el bombeo de agua, no para la energía eólica.

### 5.3 CONDICIONES EXTERNAS

Se considerarán tanto las condiciones ambientales como los parámetros de posicionamiento del aerogenerador.

#### 5.3.1 Condiciones ambientales

Altitud sobre el nivel del mar	3851 m.s.n.m
Densidad del aire	0,84 Kg/m <sup>3</sup>
Velocidad media anual	4,1 m/s

Tabla 5.1: Condiciones ambientales. Fuente: elaboración propia

### 5.3.2 Parámetros de posicionamiento del aerogenerador en el lugar de instalación

La comunidad de Vilacollo se encuentra a una altitud de 3851m.s.n.m y su orografía es complicada. Por ello, antes de realizar la instalación de los aerogeneradores será conveniente que se realice una visita a dicho lugar para elegir una zona que no tenga ningún obstáculo cercano que pueda provocar turbulencias y que a su vez tenga un buen potencial eólico.

## 5.4 CONDICIONES INTERNAS

Las condiciones internas que se van a tener en cuenta son el diseño de las palas, el diseño del generador y el diseño del sistema de transmisión. También se considerarán otros aspectos importantes como el diseño de la estructura de soporte, el peso del aerogenerador o la facilidad para reemplazar sus componentes.

Las principales características del aerogenerador son las siguientes:

- 100W de potencia nominal
- Posición vertical del eje principal (tipo Savonius)
- Generador síncrono de imanes permanentes
- Sistema de transmisión mediante poleas y correas

### 5.4.1 Diseño del rotor

El rotor consta de dos palas y dos tapas circulares, todas ellas de aluminio, ya que se trata de un material ligero que consigue que estas piezas no pesen mucho, algo importante a considerar ya que todo el peso de las mismas lo tendrá que soportar el eje y la estructura de sujeción. Además, debido a las dimensiones tan grandes que va a tener el equipo, cuanto más ligeros sean todos sus componentes mejor. Las palas irán unidas a las tapas circulares mediante unos tornillos.

Para el diseño de las palas se ha tenido en cuenta que el coeficiente de potencia del aerogenerador depende en gran medida de la forma que tengan éstas. En el caso de los aerogeneradores Savonius más sencillos, las palas consisten en unas cazoletas de forma semicilíndrica hueca. Sin embargo, y como se estudiará más detenidamente en el siguiente capítulo, mediante esta forma el coeficiente de potencia del aerogenerador es muy bajo y por tanto, la potencia que se puede extraer de él es pequeña.

Por ello, y tras estudiar los coeficientes de potencia para diferentes formas de palas, se ha optado por un diseño que consiste en unas palas rectas con extremo curvo, dispuestas de la manera que se observa en la siguiente imagen.

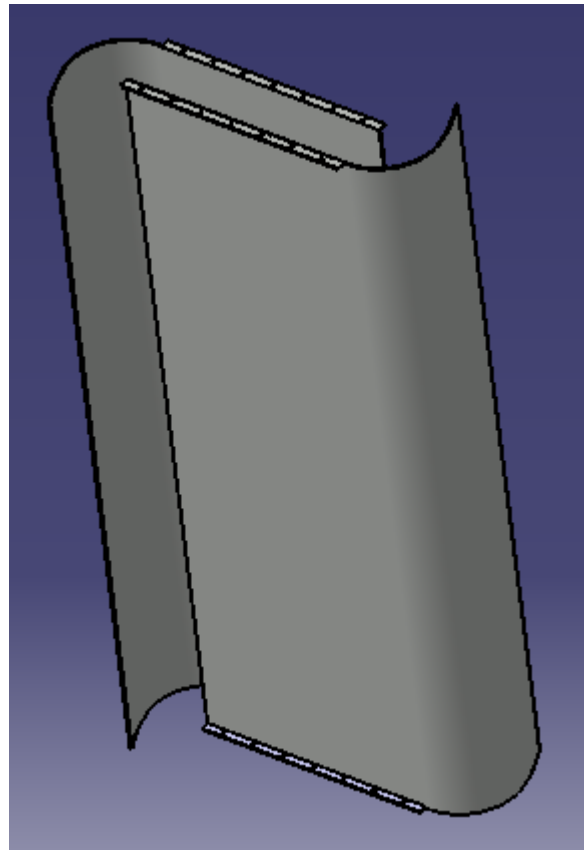


Imagen 5.2: Diseño de las palas del aerogenerador. Fuente: elaboración propia

El rotor tiene un diámetro de 1,1m y una altura de 2,2m. Estos cálculos se explican más detalladamente en el siguiente capítulo.

#### 5.4.2 Diseño del eje principal.

El eje principal sirve de unión entre el rotor del aerogenerador, formado por las palas y las tapas, y el sistema de transmisión.

Dicho eje está atornillado mediante una chapa de acero a la tapa circular inferior para que giren conjuntamente. Además, se encuentra apoyado mediante un rodamiento axial a la estructura de sujeción, consiguiendo de esta forma que el eje se encuentre en voladizo y facilitando así las labores de mantenimiento de éste y sus componentes. La parte inferior del eje está unida a la polea grande del sistema de transmisión mediante unas caras planas.

Este eje tiene forma tubular hueca de diámetro 60mm y espesor 2mm para la parte superior, y de diámetro 40mm y el mismo espesor para la parte que se encuentra por debajo del apoyo de la estructura de sujeción.



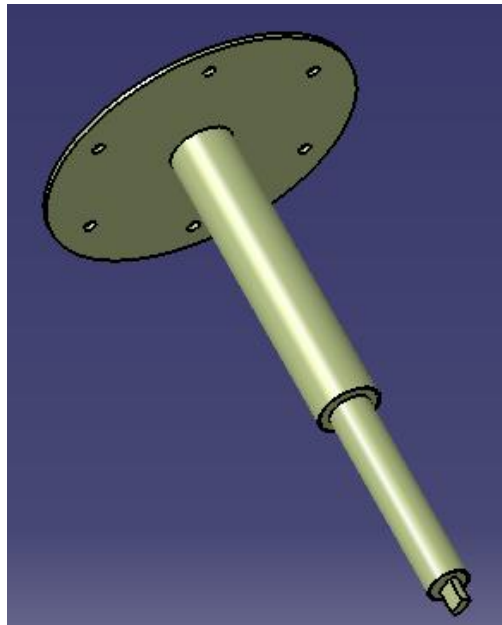


Imagen 5.3: Diseño del eje principal. Fuente: elaboración propia

#### 5.4.3 Diseño del sistema de transmisión

Se trata de un sistema de transmisión mediante poleas y correas. Este sistema es necesario ya que la velocidad de giro del eje principal del aerogenerador es muy pequeña, por lo que se necesita aumentar esta velocidad para que el generador eléctrico gire a una velocidad adecuada que le permita funcionar correctamente.

La polea grande tiene un diámetro de 300mm y la pequeña de 100mm. De esta forma se consigue una relación de transmisión  $i=3$ , como se estudiará en el siguiente capítulo.

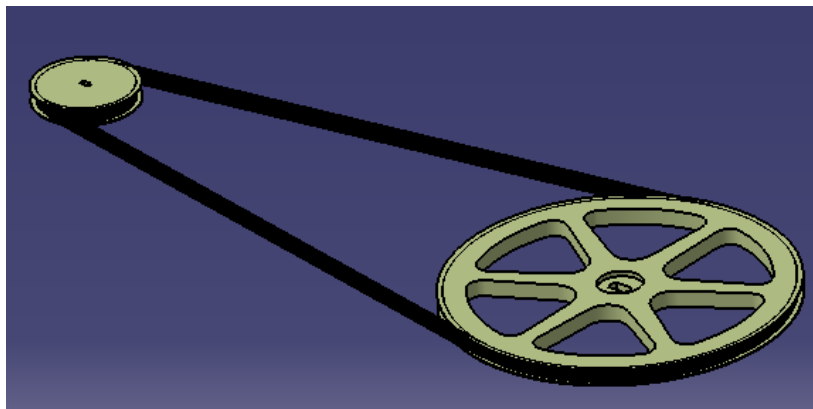


Imagen 5.4: Diseño del sistema de transmisión. Fuente: elaboración propia

Se observa en la figura anterior que la polea grande está diseñada de forma que se elimina todo el material que resulta innecesario, así, en su mayoría es hueca para disminuir su peso. Además, tanto la polea grande como la pequeña disponen de caras planas en sus agujeros centrales que sirven para fijar los ejes que pasen por éstos. El material utilizado es acero.

Las correas son correas normalizadas y están fabricadas en caucho.

#### 5.4.4 Diseño del generador eléctrico

El generador eléctrico es el componente que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Se trata de un generador de flujo axial, síncrono de imanes permanentes que trabaja a 300rpm y es capaz de conseguir una potencia de 100W para su velocidad de diseño.

Se ha elegido este tipo de generador ya que de esta forma no son necesarios los anillos rozantes. Además, disminuyen las pérdidas en el cobre del rotor y por tanto, no es necesario un sistema de refrigeración, haciendo por todo ello que el volumen de la máquina disminuya considerablemente y con ello, también su peso.

El generador está formado por el rotor y por el estator:

- *Rotor*: se trata de la parte móvil del generador. Está constituido por 2 discos de acero, uno superior y otro inferior, donde se fijan los imanes permanentes de Nd-Fe-B.

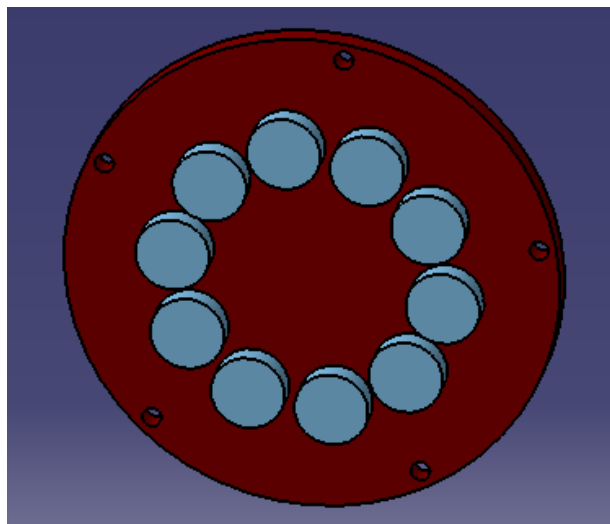
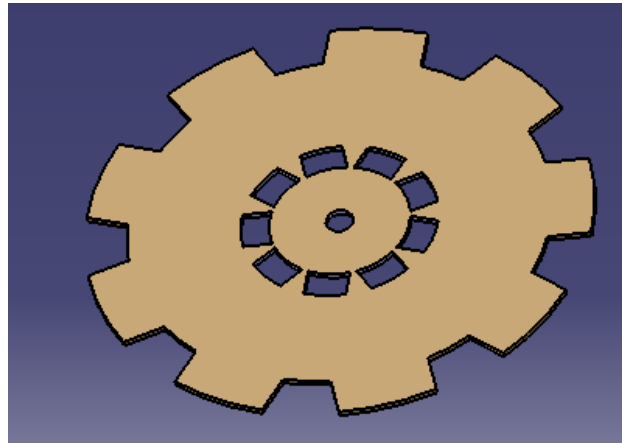


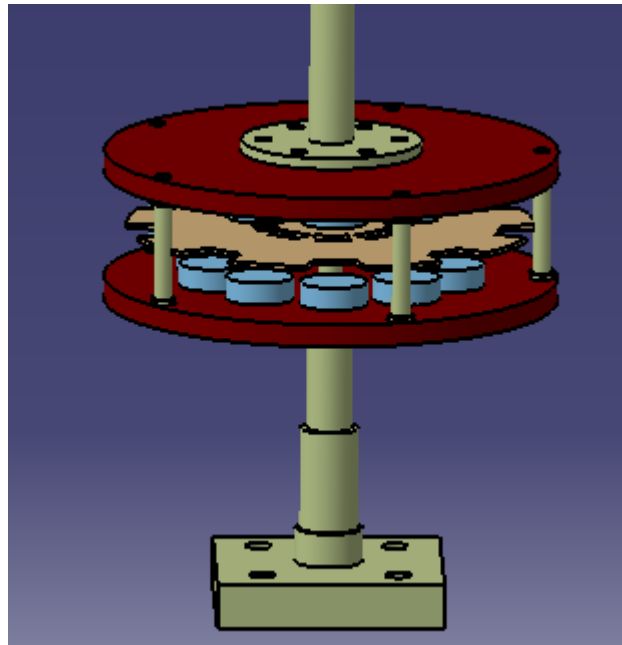
Imagen 5.5: Diseño del rotor del generador eléctrico. Fuente: elaboración propia

- *Estator:* se trata de la parte fija del generador. Está constituido por un disco fabricado en ABS donde se alojan las bobinas hechas de hilo de cobre.



*Imagen 5.6: Diseño del estator del generador eléctrico. Fuente: elaboración propia*

La configuración completa del generador se muestra en la siguiente figura.



*Imagen 5.7: Configuración del generador eléctrico. Fuente: elaboración propia*

El disco superior del rotor está atornillado al eje que se encuentra unido a la polea pequeña del sistema de transmisión. Por tanto, la polea, el eje y el rotor superior giran conjuntamente. El disco inferior se encuentra unido mediante unos tornillos y tuercas al disco superior. De esta forma se consigue que el disco inferior gire con el superior y que además, la distancia entre ambos sea la necesaria para el correcto funcionamiento del generador. El disco inferior del rotor se sujeta a la plataforma fija mediante una chumacera que le permite el giro.

El disco del estator se encuentra fijo entre los dos discos del rotor mediante un eje que está apoyado en el disco inferior del rotor.

Los discos del rotor tienen un diámetro de 200mm y el del estator de 180mm. Tanto la forma del generador como las dimensiones de éste, están estudiadas para que puedan colocarse correctamente los 10 imanes permanentes de 30mm de diámetro y 10mm de espesor, así como el bobinado con su correspondiente número de vueltas de su devanado.

#### 5.4.5. Diseño de la estructura de sujeción.

Al tratarse de un equipo de dimensiones tan grandes expuesto a vientos fuerte, será necesaria una estructura que sirva de sujeción del mismo. Esta estructura va a constar de unas barras de acero soldadas y dispuestas de la siguiente forma.

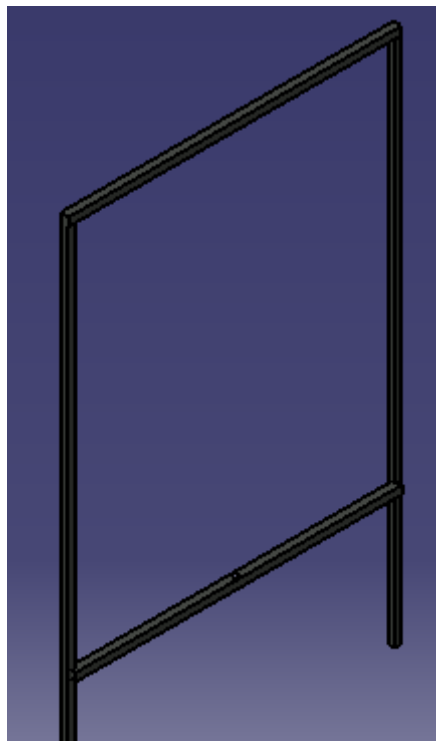


Imagen 5.8: Diseño de la estructura de sujeción. Fuente: elaboración propia

La sujeción del equipo se da de la siguiente forma:

En la parte superior del equipo se tiene un soporte tubular que se encuentra atornillado a la tapa circular superior, y que por lo tanto, gira con ella. Este soporte tubular está sujeto mediante un rodamiento radial, el cual se encuentra atornillado a través de su porta rodamiento a la estructura metálica. De esta forma, aunque halla vientos muy fuertes, el aerogenerador se encuentra bien sujeto.

Como todo el equipo va a ir montado sobre una torre de celosía a una altura de 5 metros para de esta forma aprovechar vientos mayores, la estructura metálica se encontrará sujeta mediante cables tensores al suelo, para aumentar la sujeción de todo el sistema.

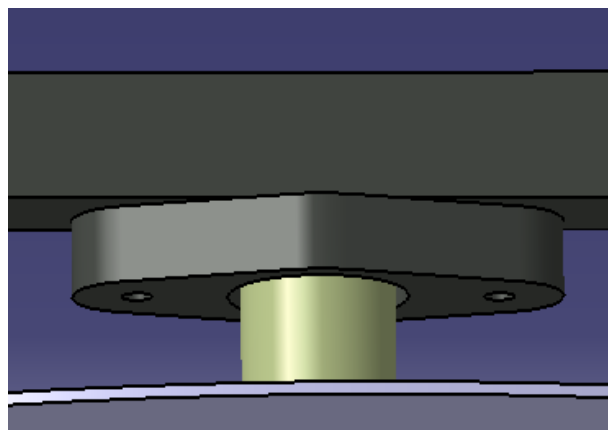


Imagen 5.9: Unión soporte superior-estructura de sujeción. Fuente: elaboración propia.

#### 5.4.6 Facilidad en el reemplazo de los componentes

El lugar donde va a ser instalado el aerogenerador no es ni de fácil acceso ni cuenta con facilidades tecnológicas. Por ello, la fabricación, la instalación, el montaje y el mantenimiento tiene que ser lo más sencillo posible. Así, las piezas y los componentes que se utilizan son fáciles a la hora de cambiarlos por otros en caso de fallo o rotura de los mismos.

Uno de los aspectos que contribuirá a la facilidad de reemplazo de estos componentes es el hecho que ya se ha comentado con anterioridad de que el eje principal se encuentra en voladizo. De esta forma si hay algún fallo en el sistema de transmisión no será necesario desmontar todo el equipo.

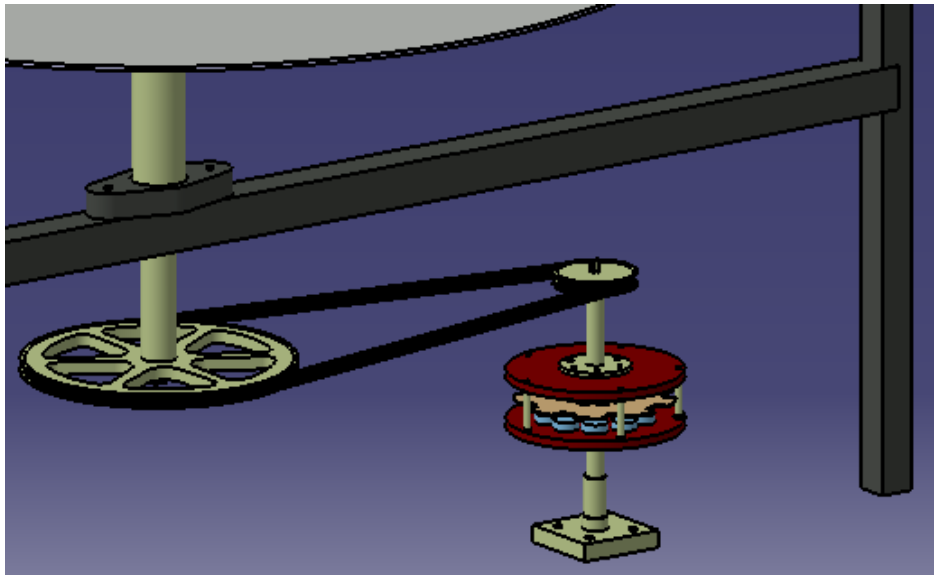


Imagen 5.10: Detalle sobre el eje principal en voladizo. Fuente: elaboración propia

#### 5.4.7 Peso del aerogenerador

El aerogenerador que se está diseñando está pensado para electrificación de comunidades rurales aisladas. En el caso de Vilacollo, se tiene un buen acceso mediante caminos. Sin embargo, si el funcionamiento del aerogenerador en esta comunidad es bueno, puede que se lleven aerogeneradores con el mismo diseño a otras comunidades que no tengan un acceso tan sencillo, por lo que se intentará que el peso del aerogenerador sea el menor posible, para que sea sencillo de transportar.

Así, los elementos se fabricarán con las medidas necesarias para su correcto funcionamiento, sin desaprovechar material e intentando eliminar éste en los casos en los que fuera innecesario. Por ello, los espesores de chapas a utilizar serán los mínimos necesarios, en los casos que pueda darse se realizarán las piezas huecas,...

Todos los detalles sobre el peso del aerogenerador se pueden consultar en el ANEXO 4.

## 6. INGENIERÍA DEL PROYECTO

### 6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se lleva a cabo la ingeniería del proyecto, es decir, se realizan todos los cálculos necesarios para dimensionar todos los elementos del equipo constitutivo final. Así, se dimensionará el rotor del generador, es decir, las palas del aerogenerador y las tapas circulares, así como el eje, el generador eléctrico, el sistema de transmisión, los rodamientos necesarios y la estructura de sujeción.

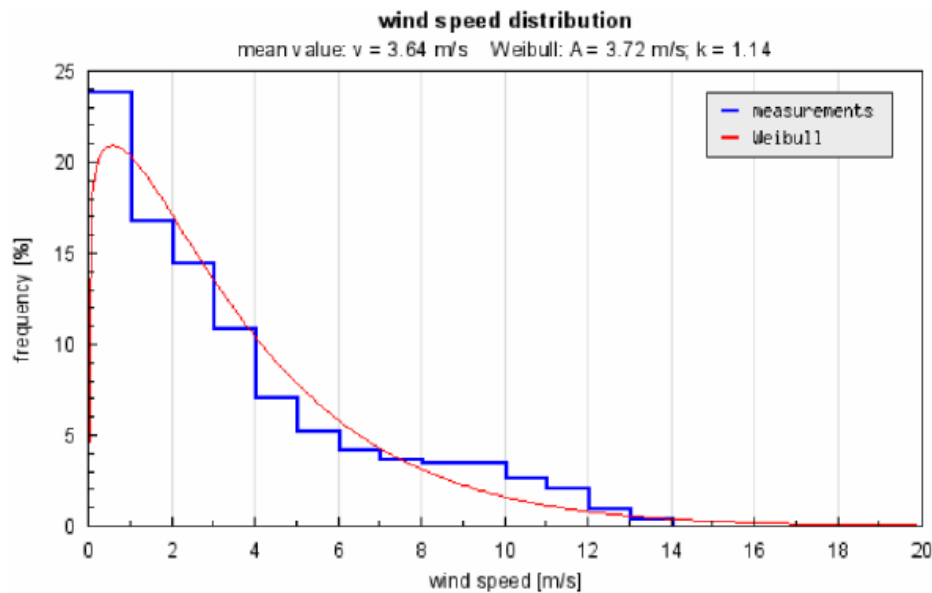
Todos estos cálculos tienen que realizarse de tal manera que el modelo cumpla con su objetivo, es decir, que tenga una potencia de 100W a la velocidad de diseño para poder suministrar electricidad a los habitantes de la comunidad de Vilacollo.

Con los cálculos realizados en este capítulo, se han llevado a cabo los planos técnicos del aerogenerador.

### 6.2 CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL ROTOR DEL AEROGENERADOR

#### 6.2.1 Determinación de la velocidad de diseño

A la hora de calcular y dimensionar el rotor, lo primero que se deberá conocer es la velocidad del viento para la cual se va a dimensionar y con la que se van a realizar todos los cálculos. Para elegir esta velocidad de diseño del aerogenerador se tendrán en cuenta los datos de viento de la zona de Vilacollo.



Gráfica 6.1: distribución Weibull en Vilacollo. Fuente: elaboración propia

Viendo esta gráfica se selecciona como velocidad de diseño 8m/s, ya que se trata de una velocidad de viento intermedia entre la máxima y la mínima. Aunque no se dé muy a menudo, si a la frecuencia de ésta se le suman las frecuencias de velocidades cercanas (entre 6m/s y 10m/s) se observa que el porcentaje de tener estos vientos es bastante elevado.

Una vez realizado el dimensionamiento del rotor, se calcula la energía en kWh que puede producir un aerogenerador de esas características dispuesto en este lugar, es decir, utilizando los datos de la distribución Weibull de viento correspondiente. Este valor se compara con los kWh demandados por la comunidad de Vilacollo y de esta forma se calcula el número de aerogeneradores de este tipo que serían necesarios para cubrir la necesidad energética de la población.

Los cálculos del número de equipos necesarios se encuentran detallados en el ANEXO 1.

### 6.2.2 Determinación de la forma de las palas

El aerogenerador Savonius se trata de un aerogenerador de arrastre, es decir, su funcionamiento se basa en la distinta fuerza aerodinámica que ejerce un flujo de aire sobre objetos de diferente forma. La fuerza aerodinámica que ejerce una corriente de aire sobre un objeto es:

$$F = C \frac{1}{2} \rho A \omega^2$$



Donde

C: coeficiente aerodinámico

$\rho$ : densidad

A: área transversal

w: velocidad relativa del aire respecto al objeto

Si se supone que el rotor está formado por un conjunto de álabes en forma de cazoletas semicilíndricas colocadas de la forma en que se indica en la siguiente figura, la acción del viento originará fuerzas distintas en la parte cóncava y convexa de estas cazoletas, lo que dará lugar a un par que provocará el giro del rotor.

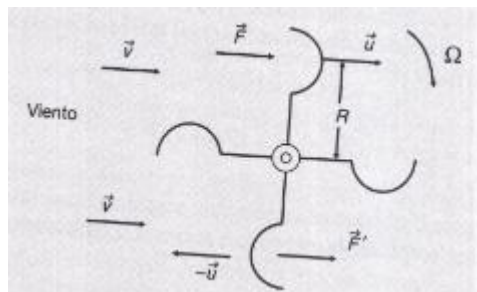


Imagen 6.1: Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial. Fuente: Energía eólica, Miguel Villarrubia

Así, se tienen dos fuerzas, F y F', que actúan en las cazoletas opuestas, que vendrán determinadas por las siguientes expresiones:

$$F = C \frac{1}{2} \rho A (v - u)^2$$

$$F' = C' \frac{1}{2} \rho A (v + u)^2$$

Donde

u: velocidad lineal de las cazoletas ( $u = \Omega R$ )

v: velocidad absoluta del viento

v - u: velocidad relativa del viento en la cazoleta superior

v + u: velocidad relativa del viento en la cazoleta inferior

La potencia que desarrolla el flujo de viento sobre el rotor será el producto de la fuerza neta por la velocidad lineal de las cazoletas. Por lo que quedará de la siguiente forma:

$$P = (F - F') = \frac{1}{2} \rho A u [C(v - u)^2 - C'(v + u)^2]$$

El valor de esta potencia se hace máximo para una velocidad lineal ( $u_m$ ), obtenida de derivar la expresión anterior e igualarla a cero. El resultado de esta velocidad es:

$$u_m = v \frac{(2a \pm (4a^2 - 3b^2)^{\frac{1}{2}})}{3b}$$

Donde

$$a = C + C'$$

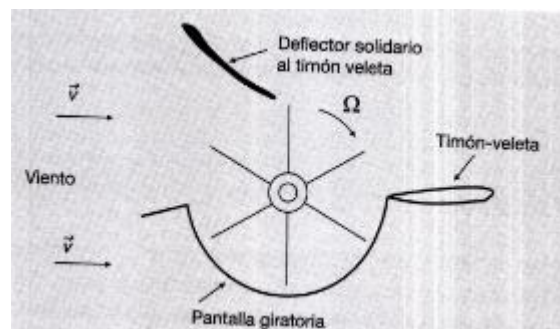
$$b = C - C'$$

Por desarrollos teóricos y comprobaciones empíricas se sabe que los coeficientes  $C$  y  $C'$  para palas de rotor semicilíndricas tienen un valor de  $C = 2,3$  y  $C' = 1,2$ .

Por lo que la potencia máxima quedaría:

$$P_{max} = 0,074 \left[ \frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

En esta expresión se observa que el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) es muy pequeño, por lo que sería necesaria un área muy grande para conseguir la potencia deseada por el aerogenerador. Por ello, se siguieron realizando estudios sobre el aerogenerador Savonius de este tipo y se llegó a la conclusión de que colocando un apantallamiento, direccionado mediante un sistema de timón-veleta, el coeficiente de potencia aumentaba considerablemente.



*Imagen 6.2: Rotor de arrastre diferencial provisto con una pantalla giratoria que impide la acción del viento sobre los álabes inferiores. Fuente: Energía eólica, Miguel Villarrubia*

El apantallamiento consigue eliminar el efecto nocivo de la fuerza  $F'$  que actúa sobre la cazoleta inferior, la cual se mueve en sentido opuesto a la velocidad del viento. De esta forma la fuerza  $F'$  se anula y la velocidad  $u_m$  a la que se consigue la potencia máxima es  $u_m = \frac{v}{3}$ , por lo que la potencia máxima conseguida en este caso es:

$$P_{max} = 0,341 \left[ \frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

Se observa que el  $C_p$  en este caso es mucho mayor. Sin embargo, el hecho de colocar un apantallamiento que esté direccionado mediante una veleta, hace que desaparezca una de las principales ventajas de los aerogeneradores de eje vertical, que es que funcionan con cualquier dirección del viento, es decir, que no necesitan veleta.

Por ello, aunque la eficiencia mejora, en este proyecto se va a optar por otro diseño del Savonius que tenga un  $C_p$  razonable y que no necesite un sistema de protección mediante direccionamiento del viento, ya que esto complicaría bastante el diseño del equipo.

De esta manera, se opta por la siguiente forma de las palas.

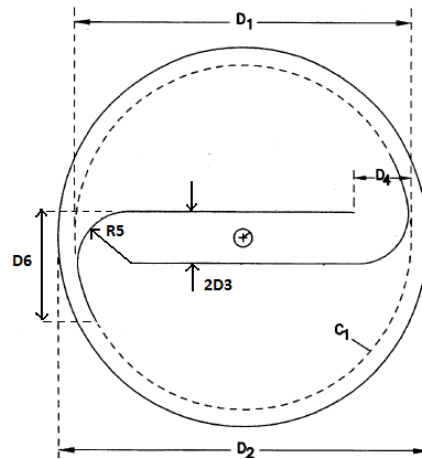


Imagen 6.3: Forma del rotor. Fuente: Wind Turbine with Savonius Type Rotor, Alvin H. Benesh

Con el siguiente diseño del Savonius se cumple con lo requerido. Por un lado, se consigue un  $C_p=0,21$ , valor bastante razonable, y además no necesita veleta para direccionar el viento. Por ello, este va a ser el diseño elegido para la realización del proyecto.

A continuación se hallarán las dimensiones que se muestran en la figura.

### 6.2.3 Determinación de las dimensiones del rotor

El dimensionamiento de la máquina debe realizarse para la velocidad de diseño determinada en el apartado anterior. De esta forma, a esa velocidad la potencia que producirá el aerogenerador será 100W.

La potencia del viento viene determinada por la siguiente expresión:

$$P_v = \frac{1}{2} A \rho v^3$$

Sin embargo, como ya se ha explicado con anterioridad, por la Ley de Betz es imposible que una máquina extraiga toda esta potencia del viento. Así, la potencia extraída por el aerogenerador dependerá de su coeficiente de potencia:

$$P_{aerog} = C_p P_v$$

$$P_{aerog} = C_p P_v = C_p \frac{1}{2} A \rho v^3$$

Además de esto, la potencia final que se conseguirá dependerá también de los rendimientos tanto del generador eléctrico como del sistema de transmisión. Por lo que la expresión de la potencia eléctrica conseguida final quedará de la siguiente forma:

$$P_{elect} = \eta_e \eta_t P_{aerog} = C_p \frac{1}{2} A \rho v^3 \eta_e \eta_t$$

Los datos para este caso concreto son los siguientes:

$$C_p = 0,21$$

$$\rho = 0,84 \text{ Kg/m}^3$$

$$v = 8 \text{ m/s}$$

$$\eta_e = 0,95$$

$$\eta_t = 0,95$$

$$P_{elect} = 100 \text{ W}$$

Por lo que el área necesaria para producir esa potencia será:

$$P_{elect} = C_p \frac{1}{2} A \rho v^3 \eta_e \eta_t \rightarrow A = \frac{2 P_{elect}}{C_p \rho v^3 \eta_e \eta_t}$$

$$A = 2,45 \text{ m}^2$$

En el caso de los rotores tipo Savonius, este área es el área barrida por el rotor, por lo que  $A = HD$ .

Además, se sabe por experiencias empíricas que la relación óptima entre el diámetro y la altura es  $H = 2D$ .

Por lo que las dimensiones del rotor serán:

$$D = 1,1m, \quad H = 2,2m$$

El resto de las dimensiones del aerogenerador, se expresan en función de este diámetro D para que su funcionamiento sea óptimo.

De esta forma, el resto de las dimensiones del rotor, que aparecen en la imagen 6.3 tendrán los siguientes valores:

$$D_2 = 1,1D = 1,21m$$

$$D_3 = 0,075D = 0,0825m$$

$$D_4 = 0,172D = 0,1892m$$

$$D_5 = 0,3D = 0,33m$$

$$D_6 = 0,32D = 0,352m$$

#### 6.2.4 Determinación de la velocidad de rotación

Para obtener la velocidad a la que gira el rotor se utiliza la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}$$

Donde

$\lambda$ : velocidad específica (velocidad tangencial de la pala/velocidad del viento)

$\omega$ : velocidad angular [rd/s]

R: radio del rotor del aerogenerador [m]

v: velocidad de diseño del viento [m/s]

En el caso de aerogeneradores tipo Savonius la velocidad específica a la que se consigue la máxima potencia tiene un valor de alrededor de 0,8. La velocidad de diseño y el radio del rotor ya se han calculado con anterioridad, por lo que:

$$\omega = \frac{\lambda v}{R} = \frac{0,8 \cdot 8}{0,55} \rightarrow \omega = 11,6 \text{rd/s}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \rightarrow n = 110 \text{rpm}$$

### 6.2.5. Estudio de las palas del aerogenerador

Para llevar a cabo el estudio sobre las palas del rotor del aerogenerador se va a utilizar el programa de elementos finitos ABAQUS SIMULIA. Para su utilización, será necesario conocer el valor de todas las fuerzas que actúan sobre las palas. Así, se determinará el espesor que deberán tener éstas para que no se produzcan deformaciones plásticas.

Inicialmente se considera un espesor determinado de las palas, se hallan las fuerzas que actúan en éstas y después de realizar el estudio mediante elementos finitos, se valora si el espesor elegido es válido para el correcto funcionamiento de las palas o se debería aumentar o disminuir su tamaño.

El espesor seleccionado inicialmente es de  $e=5\text{mm}$ .

Las fuerzas que actúan en las palas son la fuerza del viento y la fuerza centrífuga.

Para el cálculo de las fuerzas se considera un modelo simplificado de las palas. Así, se considera que la forma de las mismas consta de una parte recta y un parte curva en forma de semicircunferencia.

Considerando el espesor de las palas  $e=5\text{mm}$ , los radios de la parte curva serán:

$$R_e = 16,5\text{cm} \quad R_i = 16\text{cm}$$

En la siguiente figura se puede observar la distancia desde el centro de rotación hasta el centro de gravedad tanto de la parte curva como de la recta.

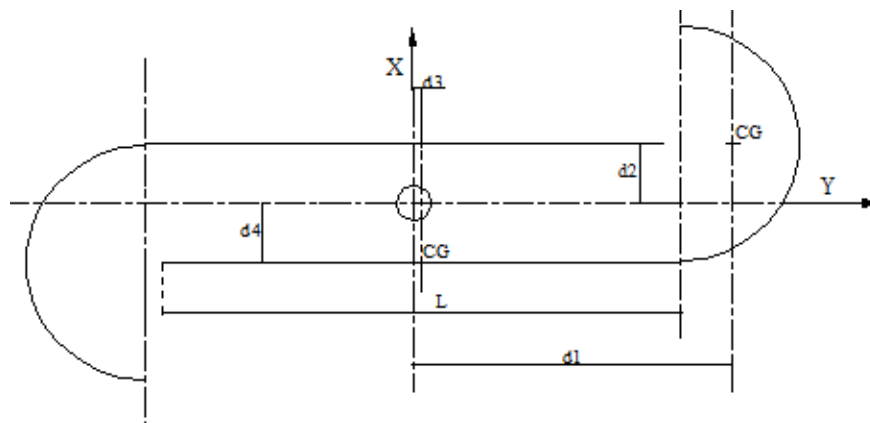


Imagen 6.4: Distancia del centro de rotación a los centros de gravedad de las partes curva y recta.

Fuente: elaboración propia.

Las medidas de estas distancias, teniendo en cuenta las dimensiones del rotor son:

$$d_1 = R_1 - R_5 + \frac{4R_e}{3\pi} = 55 - 16,5 + \frac{4 \cdot 16,5}{3\pi} = 45,5 \text{ cm}$$

$$d_2 = D_3 = 8,25 \text{ cm}$$

$$d_3 = R_1 - \left( R_5 + \frac{L}{2} \right) = 55 - \left( 16,5 + \frac{74,58}{2} \right) = 1,21 \text{ cm}$$

$$\text{donde } L = D_1 - R_5 - D_4 = 74,58 \text{ cm}$$

$$d_4 = D_3 + \frac{e}{2} = 8,5 \text{ cm}$$

A continuación, se realiza el cálculo de la fuerza del viento y de la fuerza centrífuga.

#### *Fuerza del viento*

El viento al chocar contra las palas del aerogenerador provoca una presión en éstas que viene determinada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Donde

$\rho$ : densidad del aire

$v$ : velocidad del viento

Los cálculos se van a realizar para las condiciones más desfavorables. Por ello, la velocidad de viento se considera 30m/s, la cual se da en el caso de ráfagas de viento, ya que aunque éstas no sean muy comunes, la estructura del aerogenerador deberá soportarlas aunque solo se den en momentos muy puntuales.

Así, la presión ejercida por el viento será:

$$P = \frac{1}{2} 0,84 \cdot 30^2 \rightarrow P = 378 \text{ Pa}$$

#### *Fuerza centrífuga*

La fuerza centrífuga se debe a la rotación del equipo y es la que tiende a alejar las palas del eje de rotación. Tiene la siguiente forma:

$$F = m\omega^2 R$$

Donde

m: masa del cuerpo

$\omega$ : velocidad de rotación del cuerpo

R: radio de rotación

La velocidad de rotación se considera para hacerlo de forma aproximada la calculada en el apartado anterior. Sin embargo, a la hora de calcular tanto la masa como el radio de rotación, para hacerlo de manera más exacta, se calcula por separado la parte curva y la parte recta.

- Parte curva:

En este caso, el radio de rotación de cada uno de los puntos de la parte curva no varía mucho, por lo que se toma como radio de rotación la distancia que hay desde el centro de rotación del aerogenerador al centro de gravedad de la parte curva.

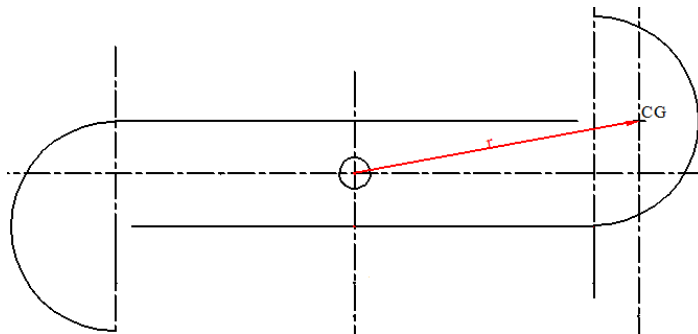


Imagen 6.5: radio de rotación de la parte curva. Fuente: elaboración propia

En este caso, con las distancias al centro de gravedad calculadas anteriormente, se tendrá:

$$r_{CG} = \sqrt{X_{CG}^2 + Y_{CG}^2} \rightarrow r_{CG} = 0,462m$$

$$m = \rho v = \rho \frac{\pi}{2} (R_e^2 - R_i^2) H, \text{ siendo } \rho = \frac{2700kg}{m^3} \rightarrow m = 12,74kg$$

$$\omega = 11,6rd/s$$

Así, en este caso la fuerza centrífuga tiene el siguiente valor:

$$F = 792N$$



- Parte recta:

En este caso, tal y como se observa en la figura, el radio de rotación de cada uno de los puntos que conforman la parte recta varía mucho, siendo muy grande en los extremos y mucho más pequeño en el centro. Por ello, si se tomara como radio el valor de uno de estos radios puntuales el error cometido al hallar la fuerza sería bastante grande.

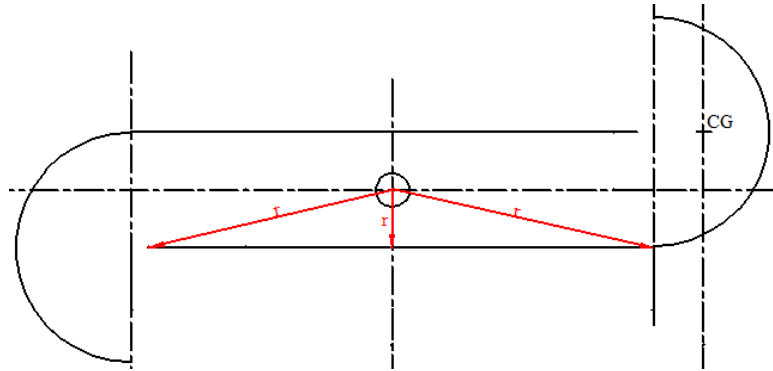


Imagen 6.6: variación del radio de rotación de la parte recta. Fuente: elaboración propia

Para solucionar esto, lo que se hace es dividir la parte recta en tres tramos, como se observa en la siguiente figura, tomando en cada uno de los tramos un radio medio. De esta forma, los errores en el cálculo de esta fuerza disminuirán considerablemente.

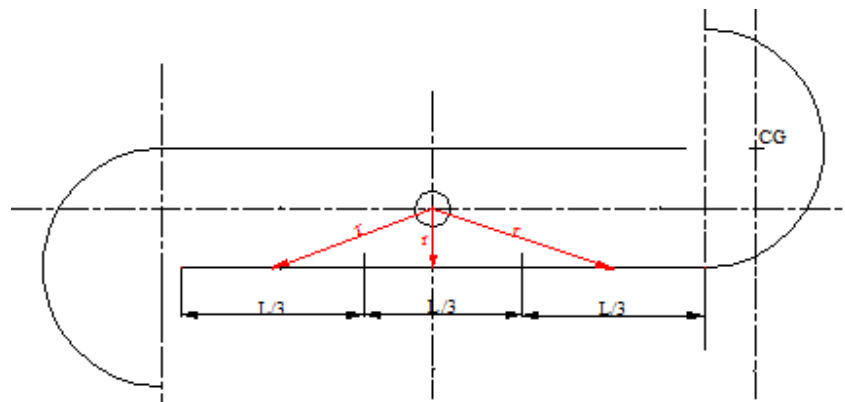


Imagen 6.7: división en tramos de la parte recta. Fuente: elaboración propia

De esta forma, los radios medios que se toman tendrán los siguientes valores:

- Tramo 1:  $r_1 = 0,38m$
- Tramo 2 (tramo central):  $r_2 = 0,0825m$
- Tramo 3:  $r_3 \approx r_1 = 0,38m$

Los valores de las masas de cada tramo serán aproximadamente un tercio del valor de la masa de la parte recta total, por lo que:

$$m = \rho v = \rho(H L e) = 2700 \cdot 2,2 \cdot 0,746 \cdot 0,005 = 22,15kg$$

$$m_1 = m_2 = m_3 = \frac{22,15}{3} = 7,38kg$$

Por tanto, los valores de las diferentes fuerzas centrífugas que actúan en la parte recta de las palas serán:

$$F_1 = m_1 \omega^2 r_1 = 7,38 \cdot 11,6^2 \cdot 0,38 = 377,4N$$

$$F_2 = m_2 \omega^2 r_2 = 7,38 \cdot 11,6^2 \cdot 0,0825 = 81,93N$$

$$F_3 = m_3 \omega^2 r_3 = 7,38 \cdot 11,6^2 \cdot 0,38 = 377,4N$$

A la hora de introducir la fuerza centrífuga en el programa de elementos finitos, ésta se considera como una presión que actúa en el interior de las palas del aerogenerador, por lo que habrá que tener en cuenta el área donde actúa.

En el caso de la parte curva, el área a considerar será:

$$A = \pi \cdot R_i \cdot H = \pi \cdot 0,16 \cdot 2,2 = 1,106m^2$$

Por tanto, la presión ejercida en esta parte será:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{792}{1,106} = 716,1Pa$$

En el caso de la parte recta, para los tres tramos se tendrá:

$$A = \frac{L}{3} H = \frac{0,7458}{3} \cdot 2,2 = 0,547m^2$$

$$P_1 = \frac{F_1}{A_1} = \frac{377,4}{0,547} = 689,9Pa$$

$$P_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{81,93}{0,547} = 149,8Pa$$

$$P_3 = \frac{F_3}{A_3} = \frac{377,4}{0,547} = 689,9Pa$$

Estos valores de presiones se introducen en el programa ABAQUS SIMULIA para realizar el estudio mediante elementos finitos. Con los resultados que se observan en el ANEXO 2 se concluye que un espesor de 5mm de las palas es suficiente para el correcto funcionamiento del equipo, sin que se produzcan deformaciones plásticas en las palas.

### 6.2.6 Estudio del eje principal

El eje es un componente muy importante a tener en cuenta en el diseño del equipo. En este caso, para realizar un cálculo aproximado del mismo se va a considerar, aunque realmente no sea exactamente así, que este eje recorre todo el rotor, desde la parte que se encuentra apoyada en la parte inferior de la estructura de sujeción, hasta la parte que está apoyada en la parte superior de dicha estructura.

De esta forma, se puede considerar el eje como una viga que se encuentra apoyada en sus dos extremos y que está sometida a flexión, como consecuencia de la acción del viento. La fuerza del viento será considerada como una carga repartida a lo largo de la longitud de la viga donde se encuentran las palas del rotor, es decir, a lo largo de una altura de 2,2m, por lo que se cumplirá

$$F_{viento} = 2,2 q = P_{viento} \cdot A = 378 \cdot 2,45 = 926,1N.$$

El esquema del estudio a realizar es el siguiente:

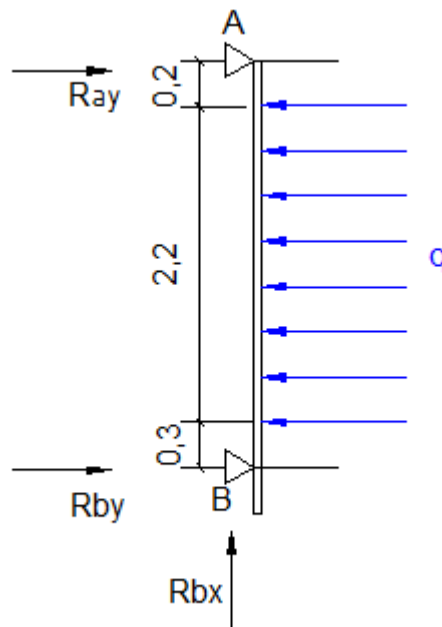


Imagen 6.8: Fuerza del viento sobre el eje. Fuente: elaboración propia.

Donde se cumple que

$$R_{bx} = 0$$

$$R_{ay} + R_{by} = q \cdot 2,2$$

$$R_{ay} \cdot 2,7 - q \cdot 2,2 \cdot \left(0,3 + \frac{2,2}{2}\right) = 0$$

Los resultados de las reacciones en los puntos de apoyo son:

$$R_{bx} = 0$$

$$R_{ay} = 480,2N$$

$$R_{by} = 445,9N$$

El momento flector máximo se dará en el punto medio de aplicación de la fuerza distribuida, es decir, a la distancia de 1,4m del apoyo B. Por tanto, este momento tendrá un valor de:

$$M_{max} = 420N \cdot m$$

Para que el eje soporte este momento se deberá cumplir:

$$\frac{M}{W_{elast\ res}} \leq \frac{\sigma_e}{c \cdot s}$$

Donde

M: momento en el eje

$W_{elast\ res}$ : módulo resistente del eje

$\sigma_e$ : límite elástico del material del eje

c.s: coeficiente de seguridad

En este caso, se toma como coeficiente de seguridad un valor de 2. El límite elástico al ser el eje de acero será  $\sigma_e = 275MPa$ .

Por lo que el módulo resistente deberá tener un valor mayor o igual que:

$$W_{elast\ resis} = \frac{M \cdot c \cdot s}{\sigma_e} = 3,49 \cdot 10^3 mm^3$$

Este módulo resistente depende de la geometría del eje, de sus dimensiones y de su espesor. En este caso el eje va a ser cilíndrico hueco, por lo que mirando en tablas, se obtiene un módulo resistente  $W_{elast\ resis} = 5,11 \cdot 10^3 mm^3$  con un eje de 60mm de diámetro y 2mm de espesor.

Estos cálculos se han realizado para la parte superior del eje, es decir, para la parte que está por encima del apoyo del mismo sobre la estructura de sujeción. Para la parte que se encuentra por debajo de este apoyo, se va a considerar un diámetro menor, con un valor de 40mm, ya que esta parte no tiene tanto peligro de fractura y por tanto, no es necesario un eje de dimensiones tan grandes.

### 6.3. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL GENERADOR ELÉCTRICO

Para realizar el cálculo y dimensionamiento del generador eléctrico se tendrán en cuenta una serie de expresiones que explican el funcionamiento del mismo. Así, en la siguiente expresión se hace referencia al circuito equivalente del generador, sabiendo que se trata de un generador de imanes permanentes que cuenta con un estator donde se encuentran los bobinados y dos discos rotor donde se alojan los imanes:

$$V = E - I(R + X_j)$$

Donde

V: voltaje en bornes de las baterías

E: fuerza electromotriz en circuito abierto

I: intensidad de corriente que pasa por el conductor

R: resistencia del conductor

X: reactancia del bobinado

El generador eléctrico va a ir conectado a unas baterías de 12V. Por lo que mediante la siguiente expresión, se deberá asegurar que el voltaje  $V$  sea siempre superior a 12V.

Mediante los siguientes cálculos se va a hallar la intensidad que va a circular por el conductor, se va a seleccionar el conductor a utilizar y además, se va a calcular el número de espiras que tiene que tener cada bobinado. Para ello, se considerará que la fuerza electromotriz tendrá un valor de  $E = 20V$ .

De esta forma, una vez realizados todos los cálculos se comprobará si realmente se cumple  $V > 12V$ .

#### 6.3.1 Determinación del número de polos

Al tratarse de un generador síncrono, éste cumple la siguiente expresión:

$$n = \frac{60f}{P}$$

Donde

n: velocidad de giro, en rpm

f: frecuencia

P: número de pares de polos

El valor de la velocidad de giro se ha calculado con anterioridad mediante la fórmula  $\omega = \frac{\lambda v}{R} = \frac{0,8 \cdot 8}{0,55} = 11,6 \text{ rad/s}$ . Por lo que calculándola en rpm se tiene  $n=110 \text{ rpm}$ .

De esta forma el número de pares de polos en este caso será:

$$P = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{110} = 27,27$$

Sin embargo, 27 pares de polos son demasiados, ya que a la hora de dimensionar el rotor del generador eléctrico saldría un rotor de dimensiones muy grandes. Por ello, va a ser necesario un sistema de transmisión.

Así, se consideran 10 pares de polos, por lo que la velocidad de giro será:

$$n = \frac{60 \cdot 50}{10} = 300 \text{ rpm}$$

Y por tanto, la relación de multiplicación será:

$$i = \frac{300}{110} = 2,72 \rightarrow i \approx 3$$

### 6.3.2 Determinación del número de bobinas

Se van a considerar 3 bobinas por fase, por lo que al ser un sistema trifásico se tiene un total de 9 bobinas en el estator del generador.

Estas bobinas van a estar conectadas en serie, por lo que entre las 3 bobinas que hay por fase hay que conseguir  $E = 20V$ . Es decir, cada bobina tendrá  $E_i = \frac{20}{3}V$

### 6.3.3 Selección de los imanes

A la hora de seleccionar los imanes se elige entre diferentes materiales y formas. Finalmente se seleccionan imanes circulares de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B) con diámetro de 30mm y altura de 10mm, por ser uno de los más económicos del mercado.

El valor del campo magnético máximo de estos imanes es de 1,3T. Sin embargo, por la propia experiencia se conoce que los imanes nunca consiguen crear un campo magnético de este valor máximo. Como en este caso no se conocen las curvas de funcionamiento de los imanes se supondrá que dichos imanes crean un campo magnético de 1,2T.

Hay que tener en consideración, que los imanes estarán enfrentados, es decir uno de polaridad Norte con otro de polaridad Sur.

### 6.3.4 Selección del conductor

Al seleccionar el conductor, se tendrá en cuenta tanto la potencia que se quiere conseguir como el voltaje. De esta forma se conocerá la intensidad que circula por dicho cable conductor. En este caso, considerando  $V = 18V$  para cumplir que  $V > 12V$ :

$$P = V \cdot I \rightarrow I = \frac{250}{18} = 13,88A$$

Teniendo en cuenta que el generador va a estar lo suficientemente refrigerado, se va a considerar una densidad de corriente de  $J = 10A/mm^2$ . Por lo tanto, para poder soportar la intensidad de corriente hallada el conductor deberá tener la siguiente sección:

$$J = \frac{I}{A} \rightarrow A = \frac{I}{J} = \frac{13,88}{10} = 1,388mm^2$$

Consultando en tablas, el conductor seleccionado es AWG 15, el cual tiene una sección de 1,65mm<sup>2</sup>, ya que el AWG 16 tiene una sección de 1,31mm<sup>2</sup>, por lo que se calentaría demasiado y no podría soportar correctamente esa intensidad de corriente.

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Kg/Km	Resistencia (Ω/Km)
15	1,45	1,65	14,7	10,3

*Tabla 6.1: Características del conductor seleccionado. Fuente:*

<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Valores-normalizados-cables-AWG.html>

### 6.3.5 Determinación del número de espiras por bobina

Para calcular el número de espiras que tiene cada bobina, se utilizará una expresión que hace referencia a la fuerza electromotriz de cada espira:

$$E = 4,44 N \cdot f \cdot B \cdot A$$

Donde

E: fem inducida en cada bobina

N: número de espiras/bobina

f: frecuencia

B: campo magnético creado por los imanes

A: área magnética

En este caso, el área magnética será el área de los imanes, pero un poco sobredimensionada, ya que también habrá campo magnético por los alrededores de los imanes aunque no esté exactamente en su área de actuación. En este caso se considera un 10% más del área real de los imanes. De esta forma se tendrá:

$$\frac{20}{3} = 4,44 \cdot N \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot (1,1\pi \left(\frac{0,03}{2}\right)^2) \rightarrow N = 32 \text{ espiras}$$

Se va a tener también en cuenta un factor de seguridad. Por ello, finalmente se considerarán  $N = 36$  espiras.

### 6.3.6 Cálculo de la longitud del bobinado

Las 36 espiras que se tienen por bobina están dispuestas en forma rectangular distribuidas en 6 filas y 6 columnas. Dada la forma del estator, como se observa en la siguiente figura, el bobinado de la primera fila tendrá unas dimensiones de  $40 \times 2 \text{ mm}$ . A partir de esta fila se irán superponiendo las demás, cada una con sus 6 columnas.



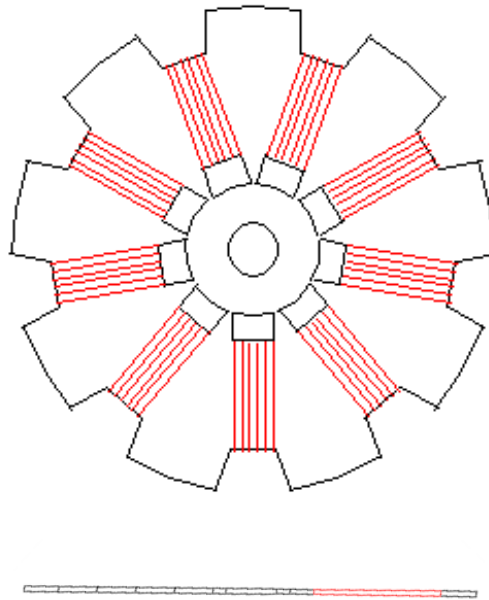


Imagen 6.9: Configuración y tamaño de las bobinas en el estator. Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan las longitudes de cada fila de bobinado.

Número de fila	Longitud/columna [mm]	Longitud total de la fila [mm]
1	$2 \cdot 40 + 2 \cdot 2 = 84$	504
2	$2(40 + 2 \cdot 1,45) + 2(2 + 2 \cdot 1,45) = 95,6$	573,6
3	$2(40 + 4 \cdot 1,45) + 2(2 + 4 \cdot 1,45) = 107,2$	643,2
4	$2(40 + 6 \cdot 1,45) + 2(2 + 6 \cdot 1,45) = 118,8$	712,8
5	$2(40 + 8 \cdot 1,45) + 2(2 + 8 \cdot 1,45) = 130,4$	782,4
6	$2(40 + 10 \cdot 1,45) + 2(2 + 10 \cdot 1,45) = 142$	852

Tabla6.2: Longitud del bobinado. Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, si se suman las longitudes de todas las filas, cada bobina tiene 4068mm, es decir, alrededor de 4m.

Teniendo en cuenta que hay un total de 9 bobinas en el estator, la longitud de cable conductor necesaria será de 36,6m.

### 6.3.7 Cálculo del voltaje final (calculando resistencia, reactancia,...)

Como se ha explicado antes, el voltaje en bornes de las baterías tiene que ser superior a 12V para que la conexión funcione correctamente. A continuación, se va a comprobar que esto se cumple. Como se realizan los cálculos por bobina y no por fase, el valor de V deberá ser mayor que  $\frac{12}{3} V$ . Por lo tanto:

$$V = E - I(R + X_j)$$

Donde

E : fem inducida en cada bobina.

I : corriente que circula por el conductor.

R: resistencia del bobinado

X: reactancia del bobinado

El valor de la fem inducida por bobina, como ya se ha comentado es  $E = \frac{20}{3} V$  y la corriente que circula por el conductor es  $I = 13,88A$ , como ya se calculó con anterioridad.

La resistencia de cada bobina se calcula a partir de las características del conductor. En la tabla 6.1 se observa que la resistencia del conductor es de  $10,3\Omega/km$ . Teniendo en cuenta que cada bobina tiene una longitud de alrededor de 4 m:

$$R = 10,3 \frac{\Omega}{km} \cdot \frac{1km}{10^3m} \cdot 4m \rightarrow R = 0,0412\Omega$$

La reactancia de la bobina tiene la forma:

$$X = 2\pi fL$$

Donde

f: frecuencia

L: inductancia magnética, de la forma  $L = 1,257\mu \frac{N^2 S}{10^8 L_a}$

Donde

$\mu$ : permeabilidad relativa del vacío

N: número de espiras por bobina

S: sección de las espiras

$L_a$ : largo de la bobina

En este caso, la permeabilidad magnética relativa del vacío es 1 y se tienen 36 espiras.

Para calcular la sección por espira, se calcula la sección de una espira media (ni de la primera fila ni de la última). Por tanto, su sección vendrá dada por la siguiente expresión:

$$S = (40 + 5 \cdot 1,45) \cdot (2 + 5 \cdot 1,45) = 437\text{mm}^2 = 0,437\text{cm}^2$$

El largo de la bobina será:

$$L_a = 6 \cdot 1,45 = 8,7\text{mm} = 0,87\text{cm}$$

Por tanto, el valor de la inductancia será:

$$L = 1,257\mu \frac{N^2 S}{10^8 L_a} = 1,257 \cdot 1 \frac{36^2 \cdot 0,437}{10^8 \cdot 0,87} = 8,18 \cdot 10^{-6} \text{H}$$

Por lo que el valor de la reactancia será:

$$X = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 8,18 \cdot 10^{-6} = 0,0026\Omega$$

El voltaje final será:

$$V = E - I(R + X_j) = \frac{20}{3} - 13,88(0,0412 + 0,026j) = 5,99V$$

$$V = 5,99V > \frac{12}{3}$$

De esta forma, se observa que con esta configuración de las bobinas se podría llevar a cabo una conexión correcta con las baterías

## 6.4 CÁLCULO DE LOS RODAMIENTOS Y DE LA ESTRUCTURA DE SUJECIÓN

La estructura de sujeción consiste en unas barras de acero soldadas. Las funciones que realiza ésta son por un lado la de soportar el eje, así como todo el peso de los componentes que se encuentran unidos a él (tapas, palas, sistema de transmisión), para permitir que dicho eje se encuentre en voladizo, y por otro lado la de sujetar la parte superior del equipo, para que no se produzca mucha flexión cuando la fuerza del viento sea muy grande. Ambas uniones del equipo con la estructura se realizan mediante rodamientos, los cuales permiten el giro libre del rotor.

En la unión superior, se utilizará un rodamiento radial capaz de soportar la fuerza del viento. Esta fuerza del viento, ya ha sido calculada en las condiciones más desfavorables y tiene un valor de 926,1N. Para ello se ha seleccionado un rodamiento SKF-61812, el cual tiene 60mm de diámetro interior (mismo diámetro que el soporte tubular que sujeta) y un diámetro exterior de 78mm. Como ya se ha comentado con anterioridad, el rodamiento irá fijo a la estructura gracias al porta rodamientos que se encuentra atornillado a ésta.

En la unión inferior, se utiliza un rodamiento axial capaz de soportar todo el peso del rotor (palas y tapas), así como el eje, el soporte tubular superior y parte del sistema de transmisión. El peso total que tiene que soportar es de 184,045kg, es decir, 1840,45N (ver ANEXO 4) Así, se ha seleccionado un rodamiento SKF-51208, cuyo diámetro interior es 40mm y el exterior es 68mm. Con estas dimensiones se consigue que el eje, el cual tiene un diámetro en la parte superior de 60mm y un diámetro en la parte inferior de 40mm, esté apoyado en este rodamiento, quedando así en voladizo.

A continuación, se van a calcular las dimensiones que tiene que tener la barra de la estructura de sujeción para que soporte todo el peso del eje y lo componentes unidos a éste.

Así, se va a considerar esta barra como una viga que se encuentra apoyada en sus dos extremos, sobre la cual actúa una fuerza puntual en su punto medio, que es la fuerza debida al peso del equipo.

El esquema del estudio a realizar es el siguiente:

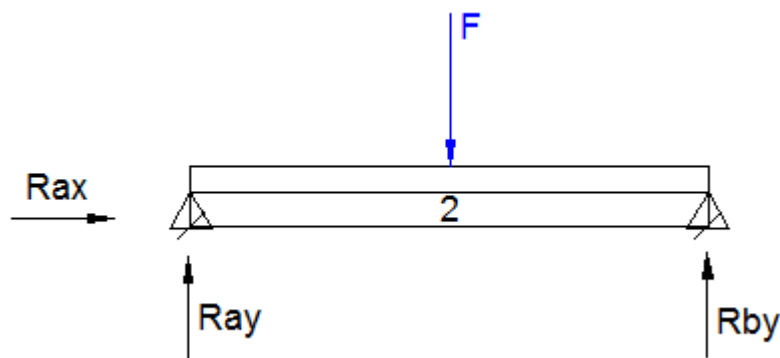


Imagen 6.10: Fuerza sobre la estructura de sujeción. Fuente: elaboración propia

Donde se cumple que

$$R_{ax} = 0$$

$$R_{ay} + R_{by} = F = 1840,45N$$

$$R_{ay} \cdot 2 - F \cdot 1 = 0$$

Los resultados de las reacciones en los puntos de apoyo son:

$$R_{ax} = 0$$

$$R_{ay} = 920,225N$$

$$R_{by} = 920,225N$$

El momento flector máximo se dará en el punto de aplicación de la fuerza. Por tanto, tendrá un valor de  $M_{max} = R_{ay} \cdot 1 = 920,225N \cdot m$

Al igual que ocurría en el caso del eje principal, para que la barra de la estructura de sujeción soporte este momento se deberá cumplir:

$$\frac{M}{W_{elast\ res}} \leq \frac{\sigma_e}{c \cdot s}$$

Donde

M: momento en la barra

$W_{elast\ res}$ : módulo resistente de la barra

$\sigma_e$ : límite elástico del material de la barra

c.s: coeficiente de seguridad

En este caso, el coeficiente de seguridad también será 2 y el límite elástico también será  $\sigma_e = 275MPa$ , ya que el material de la barra también es acero.

Por lo que el módulo resistente deberá tener un valor mayor o igual que:

$$W_{elast\ resis} = \frac{M \cdot c \cdot s}{\sigma_e} = 6,69 \cdot 10^3 mm^3$$

Al igual que ocurría en el caso del eje, este módulo resistente también depende de la geometría de la barra, de sus dimensiones y de su espesor. La barra va a tener sección hueca cuadrada, por lo que mirando en tablas se obtiene un valor del módulo de resistencia elástica de  $W_{elas\ resis} = 6,78 \cdot 10^3 mm^3$  para una barra de 50x50 con un espesor de 2,5mm.

Con estas dimensiones además, se puede llevar a cabo la perforación de la barra para que la parte inferior del eje (de 40mm de diámetro) atravesase esta barra quedando al otro lado de la misma la parte del eje donde irá montado el sistema de transmisión.

Por último, hay que considerar que en cuanto a los rodamientos, la parte del generador eléctrico también contará con un rodamiento axial. Éste, permitirá que el disco inferior del rotor gire solidario con el disco superior y que el eje que está apoyado sobre el mismo permanezca quieto, consiguiendo de esta forma que el estator también se mantenga sin movimiento. Este rodamiento deberá soportar el peso de este pequeño eje que soporta al estator y el peso del propio estator, por lo que la fuerza a soportar será bastante pequeña, en comparación con la que tienen que soportar los otros dos rodamientos. El rodamiento escogido es el SKF-BA-7, el cual tiene un diámetro interior de 7mm (coincidente con el pequeño eje que soporta al estator) y un diámetro exterior de 17mm.

Para más información sobre los rodamientos seleccionados se tiene el ANEXO 3.

## **7. INSTALACIÓN, MONTAJE, MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD**

### **7.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez que ya están calculados todos los elementos que componen el aerogenerador habrá que instalarlo en el lugar concreto. Para ello, habrá que tener en cuenta una serie de aspectos. Además, como ya se ha comentado, serán requeridos una serie de elementos adicionales como pueden ser elementos estructurales (celosía, cables tensores,...) y elementos de almacenamiento y conversión de energía (baterías,...).

Por último, hay que tener en cuenta que el equipo necesitará un mantenimiento de sus componentes para asegurar un correcto funcionamiento del mismo.

### **7.2 INSTALACIÓN Y MONTAJE**

Para llevar a cabo la instalación del aerogenerador en lugar de preparar una cimentación para soportar la estructura, es decir, una zapata, en este caso se va a sujetar el mismo mediante cables tensores.

El aerogenerador irá montado sobre una estructura de celosía de 5 metros de alto, lo suficientemente alto para que el viento no se encuentre perturbado por el suelo y lo suficientemente bajo para que puedan llevarse a cabo sin problemas acciones de reparación del equipo.

Para llevar a cabo el montaje del aerogenerador se han tenido en cuenta una serie de aspectos que hacen más sencillo su montaje y desmontaje (en el caso de averías). Así, ya se ha explicado que el eje del rotor se encuentra en voladizo para que sus elementos puedan intercambiarse sin necesidad de desmontar todo el equipo o que las palas del rotor están atornilladas a las tapas circulares, para que además de proporcionar rigidez, hagan más sencillo el desmonte de éstas si hubiera algún problema.

## 7.3 MANTENIMIENTO DEL AEROGENERADOR

El objetivo de este apartado del proyecto es determinar métodos de mantenimiento del equipo para lograr un correcto funcionamiento del mismo. Hay que señalar que debido a que la zona donde va a ser instalado el aerogenerador no cuenta con muchos avances tecnológicos, se ha intentado que tanto la fabricación como el montaje del equipo sean lo más sencillos posibles para así evitar reparaciones de mucha dificultad. Por ello, gracias a la sencillez del aerogenerador no se va a llevar a cabo un mantenimiento predictivo, pues la reparación de las piezas en caso de fallo es muy rápida, y por tanto solamente se tendrán en cuenta el mantenimiento preventivo y el correctivo.

### 7.3.1 Mantenimiento preventivo

El aerogenerador diseñado está compuesto por piezas mecánicas sencillas tales como rodamientos, tuercas, tornillos,...En el caso de estas piezas se realizará un mantenimiento programado de la siguiente forma:

- A los tres meses: reapriete y comprobación de las tuercas y tornillos de las palas, tapas, eje,...
- Mantenimiento menor: comprobaciones de pares de apriete, engrases,...
- Mantenimiento mayor: revisión íntegra de todos los componentes del aerogenerador (rotor, sistema eléctrico, eje, rodamientos, imanes, sistema de transmisión, correas, bobinado, baterías,...)
- Cada seis meses: cambio de lubricante.

### 7.3.2 Mantenimiento correctivo

Este es el mantenimiento que se lleva a cabo una vez que ya se ha producido el fallo en el sistema. Por ello, es recomendable realizar un buen mantenimiento preventivo para no tener que llegar a la realización de este mantenimiento. Aun llevando a cabo un mantenimiento preventivo correcto, al estar funcionando el aerogenerador en condiciones externas difíciles de controlar, se producirán comúnmente fallos de este tipo. En estos casos se realizará lo siguiente:

- Mantenimiento pequeño correctivo: se da cuando se producen pequeñas averías que provocan el cambio de pequeños componentes del sistema.
- Mantenimiento grande correctivo: se da cuando las averías ya son mayores y necesitan el cambio de algún componente importante del sistema como las palas, el generador eléctrico, el eje,...



## 7.4 SEGURIDAD EN EL AEROGENERADOR

Se trata de un factor imprescindible para que el equipo no esté expuesto a factores externos que puedan afectar a su funcionamiento llegando incluso a destruirlo.

Un aspecto importante es la atracción de rayos en tormentas eléctricas. Debido a la ubicación de estos equipos hay bastantes posibilidades de que el equipo atraiga a rayos. Por ello, se debe instalar y dimensionar de forma adecuada un sistema de puesta a tierra así como un buen pararrayos.

Los pararrayos suelen estar formados por un mástil metálico, bien de acero inoxidable, de aluminio o de cobre, y consta de un cabezal que se encuentra unido a tierra mediante un cable conductor que suele ser de cobre. La puesta a tierra se realiza mediante picas hincadas en el terreno o mediante placas conductoras también enterradas. El pararrayos en principio protege una zona teórica en forma cónica con vértice en el cabezal. Por ello, esta zona dependerá de la forma de este cabezal. Mediante un elemento así, se consigue reducir los daños que un rayo puede llegar a provocar sobre los elementos del equipo instalado.

## 8. COSTES DE FABRICACIÓN

En este capítulo se van a determinar los costes asociados a la fabricación del aerogenerador tipo Savonius.

Aunque se intenta que los costes sean lo más reducidos posibles, este proyecto no es comparable en cuanto al presupuesto con otros proyectos de generación de energía eléctrica que se llevan a cabo en países desarrollados, ya que la cantidad de energía que suministra un aerogenerador de este tipo es pequeña y la tecnología utilizada para su fabricación no es muy elevada.

Los precios de los elementos son aproximados, ya que muchos de ellos varían en función del fabricante. Éstos vienen dados en pesos bolivianos, ya que se trata de la moneda oficial de Bolivia. Su cambio está en 1€=8,71Bs.

A continuación, se realiza el presupuesto de cada uno de los componentes del aerogenerador. Finalmente se tendrá el presupuesto total del proyecto a realizar.

A la hora de calcular el peso de los diferentes materiales se ha tenido en cuenta el ANEXO 4.

### 8.1 COSTE MATERIALES

#### 8.1.1 Rotor

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, en el caso de este aerogenerador, las palas se van a fabricar en aluminio, ya que al ser de dimensiones muy grandes, con este material ligero se consigue disminuir el peso considerablemente. Además, se trata de un material que funciona bien al aire libre, por lo que no tendrá mayores problemas con la corrosión, la humedad,...

Las tapas circulares también se fabrican en aluminio por las mismas razones que en el caso de las palas.

El eje principal se fabrica en acero y se sujeta a la tapa circular mediante un disco de chapa atornillado.

Por tanto, los componentes del rotor serán:

- Dos palas realizadas en aluminio con un espesor de 5mm y una altura de 2,2m.
- Dos tapas circulares realizadas en aluminio con un diámetro de 1,1m y un espesor de 5mm.

- Un eje formado por dos partes, la parte superior hecha con tubo de acero de 60mm de diámetro, 2mm de espesor y 0,3m de largo, y la parte inferior hecha también con tubo de acero pero en este caso de 40mm de diámetro, 2mm de espesor y 0,2m de largo.
- Un soporte tubular de 60mm de diámetro, 2 mm de espesor y 0,2m de largo.
- Un rodamiento radial.
- Un rodamiento axial.
- Dos porta rodamientos.
- Tornillos, tuercas y arandelas.

Material	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Aluminio	155kg	6,62Bs/kg	1026,1Bs
Tubo de acero φ 60mm, e 2mm	0,5m	25Bs/m	12,5Bs
Tubo de acero φ 40mm, e 2mm	0,2m	20Bs/m	4Bs
Rodamiento radial SKF-61812	1 unidad	350Bs/unidad	350BS
Rodamiento axial SKF-51208	1 unidad	350Bs/unidad	350Bs
Porta rodamientos	2 unidades	60Bs/unidad	120Bs
Chapa de acero φ 300mm, e 5mm	2 unidades	36Bs/unidad	72Bs
Tornillos M12	16 unidades	1,4Bs/unidad	22,4Bs
Tuercas hexagonales M12	12unidades	0,3Bs/unidad	3,6Bs
Arandelas	16 unidades	0,1Bs/unidad	1,6Bs
<b>Total</b>			<b>1962,2Bs (230€)</b>

*Tabla 8.1: Coste del rotor. Fuente: elaboración propia*

### 8.1.2 Generador eléctrico

Los componentes del generador eléctrico son:

- Dos discos rotor realizados en chapa de acero de 200mm de diámetro y 10mm de espesor.
- Un disco estator realizado en chapa de acero recubierta con resina epoxi de 180mm de diámetro y 2mm de espesor.
- 20 imanes de Nd-Fe-B de 30mm de diámetro y 10mm de espesor.
- Bobinado, utilizando alambre de cobre esmaltado AWG 15.
- Un eje formado por un tubo de acero de 20mm de diámetro, 4mm de espesor y 0,1m de largo.
- Una chapa de acero de 80mm de diámetro y 5mm de espesor que sirve para fijar el eje del generador al disco superior del rotor.
- Un eje fino realizado con tubo de acero de 10mm de diámetro y 30mm de largo, donde irá montado el disco del estator.

- Un soporte formado por un tubo de acero de 20mm de diámetro, 4mm de espesor y 0,1m de largo.
- Un rodamiento axial.
- Un porta rodamientos.
- Una chumacera.
- Tornillos, tuercas y arandelas.

Material	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Chapa de acero φ 200mm, e 10mm	2 unidades	30Bs/unidad	60Bs
Chapa de acero φ 180mm, e 2mm	1 unidad	14Bs/unidad	14Bs
Resina epoxi	300g	25Bs/kg	7,5Bs
Imanes Nd-Fe-B φ 30mm, e 10mm	20 unidades	45Bs/unidad	900Bs
Alambre de cobre AWG 15	36,6m	40Bs/km	1,46Bs
Tubo de acero φ 20mm, e 4mm	0,2m	10Bs/m	2Bs
Chapa de acero φ 80mm, e 5mm	1 unidad	5Bs/unidad	5Bs
Tubo de acero φ 10mm	30mm	7Bs/m	0,21Bs
Rodamiento axial SKF-BA-7	1 unidad	350Bs/unidad	350Bs
Porta rodamientos	1 unidad	60Bs/unidad	60Bs
Chumacera φ 20mm	1 unidad	140Bs/unidad	140Bs
Tornillos M12	15 unidades	1,4Bs/unidad	21 Bs
Tuercas hexagonales M12	18 unidades	0,3Bs/unidad	5,4 Bs
Arandelas	15 unidades	0,1Bs/unidad	1,5 Bs
<b>Total</b>			<b>1568,07Bs (180€)</b>

*Tabla 8.2: Coste del generador eléctrico. Fuente: elaboración propia*

### 8.1.3 Sistema de transmisión

Los componentes del sistema de transmisión son:

- Una polea de acero de 300mm de diámetro y 15mm de espesor, la cual no será maciza sino que se eliminará bastante material de ésta para aligerarla.
- Una polea de acero de 100mm de diámetro y 15 mm de espesor.
- Una correa de caucho normalizada.

Material	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Chapa de acero φ 300mm, e 15mm	1 unidad	220Bs/unidad	220Bs
Chapa de acero φ 100mm, e 15mm	1 unidad	60Bs/unidad	60Bs
Correa de caucho normalizada	1,8m	75Bs/m	135Bs
<b>Total</b>			<b>415Bs (50€)</b>

Tabla 8.3: Coste del sistema de transmisión. Fuente: elaboración propia

#### 8.1.4 Estructura de sujeción

Está compuesta por:

- Dos barras de acero de 3,2m de largo y sección cuadrada hueca de 40x40 y un espesor de 2,5mm.
- Dos barras de acero de 2m de largo y sección cuadrada hueca de 50x50 y un espesor de 2,5mm.

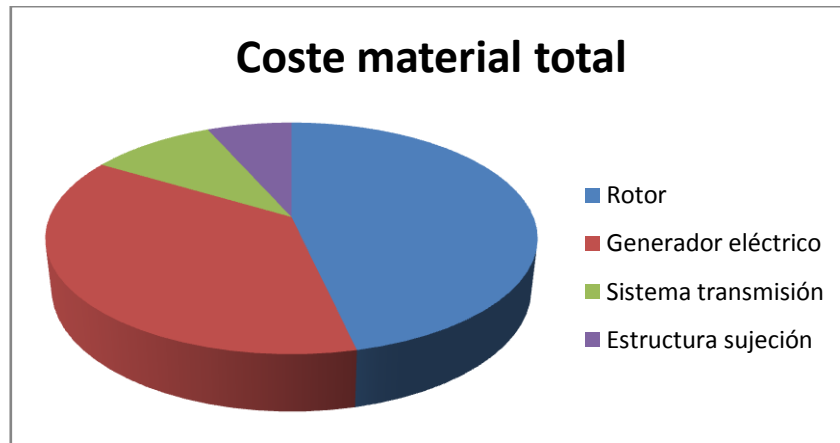
Material	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Barra de acero 40x40, e 2,5mm	6,4m	25Bs/unidad	160Bs
Barra de acero 50x50, e 2,5mm	4m	30Bs/unidad	120Bs
<b>Total</b>			<b>280Bs (30€)</b>

Tabla 8.4: Coste de la estructura de sujeción. Fuente: elaboración propia

#### 8.1.5 Coste material total

Concepto	Coste
Rotor	1962,2Bs
Generador eléctrico	1568,07Bs
Sistema de transmisión	415Bs
Estructura de sujeción	280Bs
<b>Total</b>	<b>4225,27Bs (490€)</b>

Tabla 8.5: Coste total material del equipo. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 8.1: Costes de material por concepto. Fuente: elaboración propia

A estos costes del rotor, el generador eléctrico, el sistema de transmisión y la estructura de sujeción habría que sumarles también los costes de las baterías de almacenamiento de energía, así como de la estructura de celosía que da soporte a todo el equipo y los cables tensores que sujetan la estructura.

## 8.2 COSTE TALLER

Dentro del taller se incluirá el coste de la mano de obra y de la energía consumida en el proceso.

Concepto	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Operarios	5 operarios, 70h/operario	6Bs/h	2100Bs
Energía procesos	6kWh	0,6Bs/kWh	3,6Bs
Luz	70 horas consumiendo 600W	0,6Bs/kWh	25,2Bs
<b>Total</b>			<b>2128,8Bs (245€)</b>

Tabla 8.5: Coste mano de obra y energía. Fuente: elaboración propia

## 8.3 COSTE HERRAMIENTAS

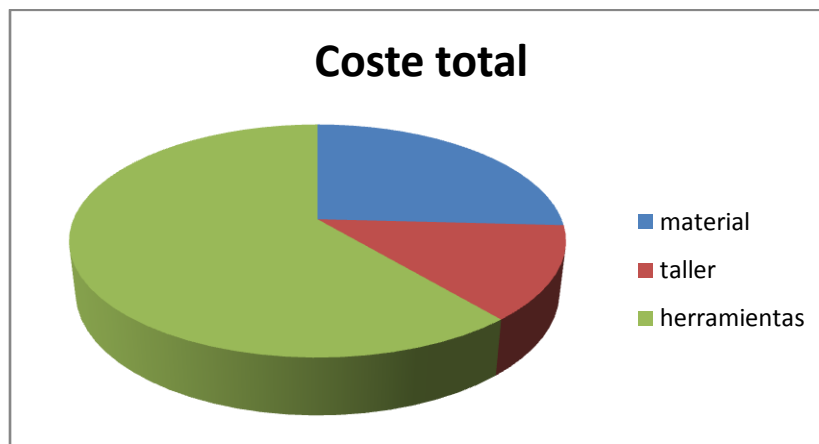
Dentro de las herramientas se incluyen los diferentes equipos necesarios para fabricar todo el aerogenerador: sierras, moldes, equipos de soldadura,... El total del coste de dichas herramientas asciende a un valor aproximado de 10000Bs (1150€).

## 8.4 COSTE TOTAL

Concepto	Coste
Material	4225,27Bs
Taller	2128,8Bs
Herramientas	10000Bs
<b>Total</b>	<b>16354,07Bs</b>

Tabla 8.6: Coste total del equipo. Fuente: elaboración propia

Por tanto, el coste de un equipo, sería de 16354,07Bs (1890€).



Gráfica 8.2: Costes totales por concepto. Fuente: elaboración propia

Se observa que el mayor coste es el debido a las diferentes herramientas necesarias para la construcción del equipo. Sin embargo, hay que considerar que estas herramientas si hay que comprarlas solamente se compran en el momento de realizar el primer aerogenerador, por tanto, el gasto asociado a su compra solamente se tendrá en cuenta una vez.

Además, en cuanto al coste del taller, también hay que considerar que no lleva el mismo tiempo construir el primer modelo que los siguientes, ya que en los siguientes se conocen mejor todos los pasos que hay que llevar a cabo y por tanto, los operarios tardarán menos tiempo. Así, el salario de los trabajadores será menor por disminuir la cantidad de horas que trabajan y la energía consumida en el taller también será menor.

De esta forma, de los 16354,07Bs (1890€) que costaría fabricar el primer aerogenerador, los siguientes podrían disminuir su costo a aproximadamente la mitad, es decir, alrededor de 8000Bs (940€).

## 9. CONCLUSIONES

El presente proyecto quiere servir de ayuda en el problema sobre electrificación rural que hay en Bolivia, un país que cuenta con muchos recursos naturales pero no tantos energéticos y que además posee el inconveniente de tener una población muy dispersa para poder ampliar la red eléctrica. Por tanto, es un avance y una apertura de posibilidades para la utilización de las energías renovables en este campo de aplicación.

El diseño del aerogenerador llevado a cabo intenta dar solución a dicho problema de una manera sencilla y aunque, desde el punto de visto ingenieril, todavía quedan muchos detalles por fijar, mediante este proyecto se quiere dar un primer paso que serviría para la construcción de un prototipo inicial fiable.

Desde el punto de vista económico, dicho proyecto no resulta muy caro, ya que como se ha observado, aunque la realización del primer aerogenerador, será algo menos económico, el resto de aerogeneradores serán mucho más baratos. Aun y todo, hay que tener en cuenta que en un país como Bolivia, una cantidad de dinero de ese calibre supone mucho más, por lo que tampoco les parecerá un proyecto excesivamente económico. Sin embargo, hay que resaltar que una vez esté amortizada la inversión inicial, que es la más costosa, el mantenimiento y la mano de obra posterior son prácticamente nulos, ya que el equipo es muy sencillo. Además, también hay que destacar que toda la fabricación se puede llevar a cabo en talleres locales, con mano de obra y material prácticamente todo del propio lugar de trabajo, algo que también resulta muy ventajoso.

Por todo ello, se puede concluir que aunque un rotor Savonius comúnmente se utilizaba para el bombeo de agua, con éste puede conseguirse también la generación eléctrica. Su principal inconveniente será que al tener un coeficiente de potencia tan pequeño, las dimensiones del equipo serán bastante grandes y sería complicado fabricar aerogeneradores Savonius de mayor potencia, 500W por ejemplo, para electrificar a una comunidad entera y de esta forma no tener que montar un número de equipos elevado.

Si en algún momento, este proyecto comienza a realizarse sería conveniente que antes de fabricar el prototipo real, se hicieran diferentes modelos con distinta forma de las palas, para comprobar que realmente el propuesto aquí es el que consigue una extracción de energía mayor, ya que este parámetro es de gran importancia en el diseño del sistema.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

*ENERGÍAS RENOVABLES Y DERECHO DE ACCESO A LA ENERGÍA. Miguel Fernández, La Paz (2010).*

*DIAGNÓSTICO DEL SECTOR ENERGÉTICO EN EL ÁREA RURAL DE BOLIVIA. Walter Canedo Espinoza, OLADE (2005)*

*DISEÑO DE MÁQUINAS EÓLICAS DE PEQUEÑA POTENCIA. Mario A. Rosato. (1991)*

*ENERGÍA EÓLICA. Pedro Fernández Díez, Universidad de Cantabria.*

*ENERGÍA EÓLICA. Miguel Villarrubia (2004)*

*PROYECTO "MEJORA DEL ACCESO A LA ENERGÍA EN LAS COMUNIDADES RURALES DE BOLIVIA", Ingeniería Sin Fronteras y CINER (2009).*

*DISPOSICIONES TÉCNICAS PARA INSTALACIONES EN BAJA Y MEDIA TENSIÓN (01/12/2004).*

*ESTUDIO Y DESARROLLO DEL AEROGENERADOR IT-PE-100. Pablo Paz, ISF (2009).*

*WIND TURBINE WITH SAVONIUS-TYPE ROTOR. Alvin H. Benesh, United States Patents (1996).*

*VICEMINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS DE BOLIVIA.*

*GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS. H. Enríquez, Limusa (2000).*

*REGLAMENTO PARA INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN. Sociedad de Ingenieros de Bolivia, La Paz (1996).*

*MICROAEROGENERADOR PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL, IDTG Soluciones Prácticas, Serie Manuales n°34 (2009)*

*DISEÑO DE AEROGENERADORES CON IMANES PERMANENTES PARA APLICACIONES EN ELECTRIFICACIÓN RURAL. P. Baillaire Rosenman, Universidad de Chile (2007).*

*MANUAL FOR WIND TURBINE CONSTRUCTION. Hugh Piggot (2005).*

*ESPECIFICACION TECNICA PARA LA REPLICA EN LA UPC DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA. Juan Antonio Monterrubio y Natxo De Marc, Universidad politécnica de Cataluña (2006).*

*DISEÑO ESTRUCTURAL DE AEROGENERADORES, Raul Campos Q, Universidad de Chile (2006).*

## **Paginas Web**

ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA EÓLICA: [www.lawea.org](http://www.lawea.org)

GLOBAL ENERGY NETWORK INSTITUTE: [www.geni.org](http://www.geni.org)

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO: [www.undp.org](http://www.undp.org)

BANCO MUNDIAL: [www.bancomundial.org](http://www.bancomundial.org)

INGENIERÍA SIN FRONTERAS: [www.isf.es](http://www.isf.es)

3TIER: [www.3tier.com](http://www.3tier.com)

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DE BOLIVIA: [www.ine.gob.bo](http://www.ine.gob.bo)

AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA: [www.iea.org](http://www.iea.org)

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD: [www.who.int](http://www.who.int)

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO: [www.iadb.org](http://www.iadb.org)

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL: [www.gwec.net](http://www.gwec.net)

RODAMIENTOS Y SISTEMAS DE LUBRICACIÓN SKF: [www.skf.com](http://www.skf.com)

TRANSPORTADORA DE ELECTRICIDAD BOLIVIANA: [www.tde.com.bo](http://www.tde.com.bo)

GOOGLE EARTH

[www.google.com](http://www.google.com)

<http://es.libros.redsauce.net/>

# ANEXOS

## ANEXO 1

### CÁLCULO DEL NÚMERO NECESARIO DE AEROGENERADORES A INSTALAR PARA CUBRIR LA DEMANDA ENERGÉTICA

En este apartado se va a calcular el número de aerogeneradores que es necesario instalar en la comunidad, concretamente en cada bloque de familias, para cubrir las necesidades energéticas de la misma.

Para llevarlo a cabo, se calculará en primer lugar la energía producida por un aerogenerador durante un periodo de tiempo de un año. A continuación, se calculará la energía que necesita cada bloque de familias también durante el periodo de un año. Por último, se compararán dichos resultados y se determinará el número de aerogeneradores que serán necesarios en cada bloque de familias para cubrir tanto la demanda actual como la demanda futura.

Mediante la distribución Weibull asociada al viento en la comunidad de Vilacollo se obtiene la siguiente tabla, donde se muestra con qué frecuencia sopla el viento a cada velocidad.

Velocidad viento [m/s]	Frecuencia de viento a esa velocidad [%]
1	24
2	17
3	13,5
4	10
5	8
6	6,5
7	5
8	5
9	4,5
10	3,5
11	2
12	1

Tabla 1: Frecuencias de viento a diferentes velocidades. Fuente: elaboración propia.

Conocidas las dimensiones del aerogenerador, se puede hallar la potencia que tendría el aerogenerador para cada velocidad del viento. Ampliando la tabla anterior, se puede conocer el número de horas al año que el viento sopla a cada velocidad. Por tanto, combinando ambos datos, se puede determinar la energía que produciría el aerogenerador durante un periodo de tiempo de un año.

Velocidad viento [m/s]	Frecuencia [%]	Nº horas/año a esa velocidad	Potencia a esa velocidad [W]	Energía producida/año [kWh]
1	24	2102,4	0,19502123	0,41001262
2	17	1489,2	1,5601698	2,32340487
3	13,5	1182,6	5,26557308	6,22706672
4	10	876	12,4813584	10,93367
5	8	700,8	24,3776531	17,0838593
6	6,5	569,4	42,1245846	23,9857385
7	5	438	66,8922802	29,2988187
8	5	438	99,8508672	43,7346798
9	4,5	394,2	142,170473	56,0436005
10	3,5	306,6	195,021225	59,7935076
11	2	175,2	259,57325	45,4772335
12	1	87,6	336,996677	29,5209089
<b>Total</b>			1186,50913	324,832501

Tabla 2: Energía producida por el aerogenerador durante un año. Fuente: elaboración propia

Por tanto, se observa que un aerogenerador produce 324,83kWh durante un periodo de tiempo de un año.

A continuación se estudia la demanda energética de los bloques de familias.

*Bloque 14 familias*

Horas del día	Energía consumida en el año cero [Wh]	Energía consumida en el año diez [Wh]
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	504	612
6	504	612
7	91	122,4
8	35	54,4
9	35	54,4
10	35	54,4
11	51,8	105,4
12	51,8	105,4
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	35	54,4
19	553	693,6
20	620,2	872,1
21	620,2	872,1
22	0	0
23	0	0
24	0	0
<b>Total</b>	<b>3136</b>	<b>4212,6</b>

Tabla 3: Energía consumida por el bloque de 14 familias en el año 0 y 10. Fuente: elaboración propia

Por tanto, realizando los cálculos para el periodo de un año se tendrá:

- Año cero:

$$3136Wh/día \cdot \frac{1kWh}{10^3Wh} \cdot \frac{365días}{1año} = 1144,64kWh/año$$

$$\frac{1144,64kWh/año}{324,83kWh/año \text{ aerogenerador}} = 3,52 \text{ aerogeneradores}$$

- Año diez:

$$4212,6Wh/día \cdot \frac{1kWh}{10^3Wh} \cdot \frac{365días}{1año} = 1537,6kWh/año$$

$$\frac{1537,6kWh/año}{324,83kWh/año \text{ aerogenerador}} = 4,73 \text{ aerogeneradores}$$

Por lo que se observa que inicialmente se cubriría la demanda energética instalando 4 aerogeneradores, pero para cubrir la demanda futura deberán ser instalados un total de 5 equipos.

#### Bloque 20 familias

Horas del día	Energía consumida en el año cero [Wh]	Energía consumida en el año diez [Wh]
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	720	864
6	720	864
7	130	172,8
8	50	76,8
9	50	76,8
10	50	76,8
11	74	148,8
12	74	148,8
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	50	76,8
19	790	979,2
20	886	1231,2
21	886	1231,2
22	0	0
23	0	0
24	0	0
<b>Total</b>	<b>4480</b>	<b>5947,2</b>

Tabla 4: Energía consumida por el bloque de 20 familias en el año 0 y 10. Fuente: elaboración propia

Por tanto, realizando los cálculos para el periodo de un año se tendrá:

- Año cero:

$$\frac{4480Wh}{\text{día}} \cdot \frac{1kWh}{10^3Wh} \cdot \frac{365\text{días}}{1\text{año}} = 1635,2kWh/\text{año}$$

$$\frac{1635,2kWh/\text{año}}{324,83kWh/\text{año aerogenerador}} = 5,03 \text{ aerogeneradores}$$

- Año diez:

$$\frac{5947,2Wh}{\text{día}} \cdot \frac{1kWh}{10^3Wh} \cdot \frac{365\text{días}}{1\text{año}} = 2170,7kWh/\text{año}$$

$$\frac{2170,7kWh/\text{año}}{324,83kWh/\text{año aerogenerador}} = 6,68 \text{ aerogeneradores}$$

Se observa que aunque en el año cero se podría cubrir la demanda únicamente con 5 aerogeneradores, en el futuro esto no será posible, ya que al producirse un crecimiento en la población, la demanda también aumentará y por tanto se necesitarán un total de 7 aerogeneradores.

En este caso, se realizará desde un principio la instalación de los 7 aerogeneradores, ya que aunque pueda parecer que se están desaprovechando los recursos, hay que tener en cuenta que en este bloque también se encuentran la escuela y el hospital, por lo que a la demanda energética calculada habrá que añadirle la demanda de la escuela y la del hospital. De esta forma, ya en el año cero no sería posible la cobertura energética total solamente con 5 aerogeneradores.

#### *Bloque de 17 familias*

En este caso no se van a realizar los cálculos, ya que se trata de un bloque de tamaño medio, entre el bloque de 14 familias y el de 20, por lo que se estimará que con 4 aerogeneradores se cubrirá la demanda actual y con 6 la demanda futura.

Por lo tanto, el proyecto de electrificación de la comunidad de Vilacollo necesitará inicialmente la instalación de 14 equipos, aunque para el año diez este número de equipos deberá haber aumentado a 18, todos ellos distribuidos en los distintos bloques de familias como se acaba de calcular de manera detallada.

## ANEXO 2

### ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN LAS PALAS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

A la hora de realizar el estudio de las palas, como se ha comentado en el capítulo 6, se considera inicialmente un determinado espesor de las palas, se calculan las fuerzas que actúan en éstas (fuerza del viento y fuerza centrífuga) y se observa mediante el programa de elementos finitos ABAQUS SIMULIA si el espesor seleccionado inicialmente es bueno para el correcto funcionamiento del equipo.

Para decidir que espesor inicial tomar, se van a calcular los desplazamientos que tendrían las palas en la situación más desfavorable. Para ello, se consideran las palas como una viga que se encuentra empotrada en uno de sus lados y en voladizo en el otro, y que está sometida a flexión debido a la fuerza del viento, que también será considerada para el caso más desfavorable, es decir, para una velocidad de viento de 30m/s (ráfaga de viento).

El espesor que se va a considerar para las palas es de  $e=5\text{mm}$ . Por tanto, los radios de la parte curva serán:

$$R_e = 16,5\text{cm} \quad R_i = 16\text{cm}$$

De esta manera, el desplazamiento de las palas sería:

$$\delta = \frac{FL^3}{8EI}$$

Donde

F: fuerza del viento

L: longitud de la "viga"

E: módulo elástico de Young del material

I: inercia

A continuación se realizan los cálculos para hallar todos estos parámetros.



### *Fuerza del viento*

Como ya se calculó en el capítulo 6, para el caso de tener un viento a una velocidad de 30m/s (ráfaga de viento), esta fuerza tiene un valor de:

$$F = 926,1N$$

### *Longitud de la viga*

Ésta será la altura de las palas, es decir,  $L = 2,2m$ .

### *Módulo elástico de Young*

El material a utilizar es aluminio, que tiene un módulo de Young  $E = 70GPa$ .

### *Cálculo de la inercia*

Se calculará la inercia tanto de la parte curva como de la parte recta.

Los momentos de inercia respecto a los centros de gravedad tendrán la siguiente forma:

- Corona semicircular:  $I_y = \frac{\pi(R_e^4 - R_i^4)}{8}$      $I_x = \frac{\pi(R_e^4 - R_i^4)}{8} - \frac{8(R_e^4 - R_i^4)}{9\pi}$
- Rectángulo:  $I_x = \frac{bh^3}{12}$      $I_y = \frac{hb^3}{12}$

Además, también será útil el teorema de Steiner  $I_x = I_{x1} + Ad^2$ . De esta forma se pueden calcular los momentos de inercia respecto a ejes paralelos al eje que contiene al centro de masas.

En el capítulo 6, ya se calcularon las distancias de los correspondientes centros de gravedad, al centro de rotación mediante el esquema que se muestra en la siguiente figura.

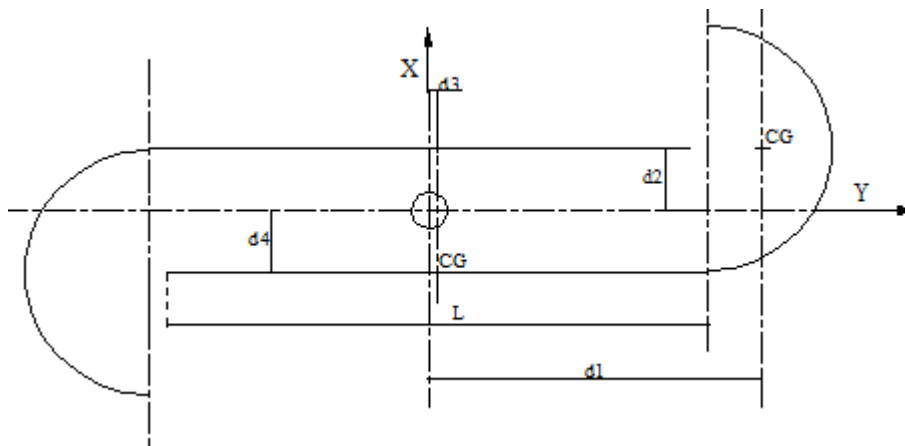


Imagen 1: Distancia del centro de rotación a los centros de gravedad. Fuente: elaboración propia.

Los valores de estas distancias hallados son:

$$d_1 = R_1 - R_5 + \frac{4R_e}{3\pi} = 55 - 16,5 + \frac{4 \cdot 16,5}{3\pi} = 45,5 \text{ cm}$$

$$d_2 = D_3 = 8,25 \text{ cm}$$

$$d_3 = R_1 - \left( R_5 + \frac{L}{2} \right) = 55 - \left( 16,5 + \frac{74,58}{2} \right) = 1,21 \text{ cm}$$

$$\text{donde } L = D_1 - R_5 - D_4 = 74,58 \text{ cm}$$

$$d_4 = D_3 + \frac{e}{2} = 8,5 \text{ cm}$$

Por tanto, realizando los correspondientes cálculos, para la parte curva los momentos de inercia serán:

$$\text{Respecto al eje x: } I_x = \frac{\pi(R_e^4 - R_i^4)}{8} - \frac{8(R_e^4 - R_i^4)}{9\pi} + \frac{\pi}{2}(R_e^2 - R_i^2)d_1^2 \rightarrow I_x = 53786,2 \text{ cm}^4$$

$$\text{Respecto al eje y: } I_y = \frac{\pi(R_e^4 - R_i^4)}{8} + \frac{\pi}{2}(R_e^2 - R_i^2)d_2^2 \rightarrow I_y = 5108,3 \text{ cm}^4$$

Para la parte recta los momentos de inercia serán:

$$\text{Respecto al eje x: } I_x = \frac{hb^3}{12} + (hb)d_3^2 \rightarrow I_x = 17339,05 \text{ cm}^4$$

$$\text{Respecto al eje y: } I_y = \frac{bh^3}{12} + (hb)d_4^2 \rightarrow I_y = 2695 \text{ cm}^4$$

$$\text{donde } h = e = 0,5 \text{ cm}, \quad b = L = 74,58 \text{ cm},$$

Por tanto, la inercia total será:

$$I_{x \text{ total}} = 2I_{x \text{ curva}} + 2I_{x \text{ recto}} \rightarrow I_{x \text{ total}} = 142250,5 \text{ cm}^4$$

$$I_{y \text{ total}} = 2I_{y \text{ curva}} + 2I_{y \text{ recto}} \rightarrow I_{y \text{ total}} = 15606,6 \text{ cm}^4$$

Los ejes x e y no son ejes principales de inercia, por lo que el producto de inercia  $I_{xy}$  no tendrá valor nulo, sino que será de la forma:  $I_{xy} = A X_{CG} Y_{CG}$

Considerando las distancias calculadas antes del centro de rotación a los centros de gravedad se tiene que:

$$\text{Parte curva: } I_{xy} = \frac{\pi}{2} (R_e^2 - R_i^2) X_{CG} Y_{CG} \rightarrow I_{xy} = 9581,6 \text{ cm}^4$$

$$\text{Parte recta: } I_{xy} = (b h) X_{CG} Y_{CG} \rightarrow I_{xy} = -383,5 \text{ cm}^4$$

Por tanto, la  $I_{xy \text{ total}}$  será:

$$I_{xy \text{ total}} = 2I_{xy \text{ curva}} + 2I_{xy \text{ recta}} \rightarrow I_{xy \text{ total}} = 18396,2 \text{ cm}^4$$

El tensor de inercia tendrá la forma:

$$\begin{pmatrix} I_x & I_{xy} \\ I_{xy} & I_y \end{pmatrix}$$

Por tanto, para hallar los momentos de inercia principales, que se darán en los ejes de inercia principales, habrá que resolver el siguiente determinante:

$$\begin{vmatrix} I_x - I & I_{xy} \\ I_{xy} & I_y - I \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{vmatrix} 142250,5 - I & 18396,2 \\ 18396,2 & 15606,6 - I \end{vmatrix} = 0$$

Los valores de los momentos de inercia principales serán:

$$I_1 = 1,449 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 \quad I_2 = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

El desplazamiento mayor, se dará en el caso de menor inercia, por lo que para su cálculo se considerará  $I_2$ . Así, el valor de este desplazamiento será:

$$\delta = \frac{FL^3}{8EI} \rightarrow \delta \approx 0,1 \text{ mm}$$

El desplazamiento de las palas es pequeño, por lo que para la realización de los cálculos de las fuerzas y el estudio mediante elementos finitos se considerará como adecuando este espesor de 5mm. Al realizar el estudio mediante ABAQUS SIMULIA con este espesor se verá realmente si es un espesor adecuado.

A continuación se hace un breve resumen de los pasos a seguir para llevar a cabo la simulación por elementos finitos.

### 1. Introducción de la pieza.

En este caso, la pieza de las palas fue importada desde el programa de diseño gráfico CATIA V5.

### 2. Introducción de las características de los materiales.

El material utilizado es aluminio. Las características que se consideraron son las siguientes:

Característica	Valor
Módulo de Young	E=70GPa
Coefficiente de Poisson	$\sigma=0,34$
Densidad	$\rho=2700\text{kg/m}^3$

*Tabla1: Características del material. Fuente: elaboración propia*

### 3. Selección del tipo de análisis que se quiere realizar.

En este caso se trata de un análisis estático.

### 4. Modelización de la pieza.

La pieza se considera como una viga que se encuentra empotrada en uno de sus lados, es decir, en este extremo hay que restringir todos los grados de libertad. Se elige este caso, ya que se trata de la situación más desfavorable, en la que la parte superior de las palas se encuentra en voladizo.

## 5. Introducción de los valores de las fuerzas.

Las fuerzas consideradas son la fuerza centrífuga y la fuerza del viento.

La fuerza centrífuga se modeliza como una presión que actúa en la parte interna de las palas. Los valores utilizados son los calculados en el capítulo 6, por lo que se tienen en cuenta los diferentes radios de la parte recta de las palas y se supone un radio constante para la parte curva.

La fuerza del viento también se modeliza como una presión que actúa en la cara externa de las palas y también en parte de la cara interna de la zona de curvatura y alrededores.

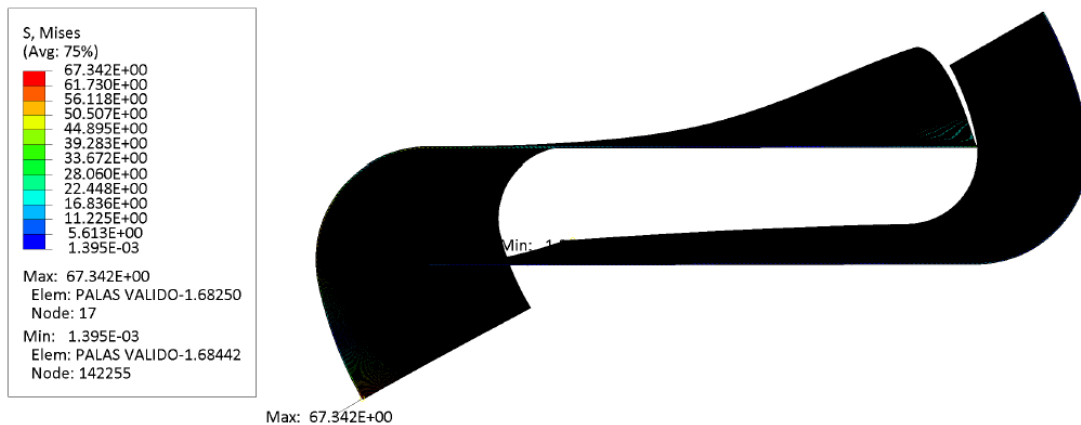
## 6. Mallado

El mallado utilizado en este caso ha sido un mallado hexagonal.

## 7. Resultados

Los resultados obtenidos son los que se muestran en las siguientes figuras.

*Esfuerzo de Von Misses:*



*Imagen 1: Esfuerzo en las palas. Fuente: ABAQUS SIMULIA*

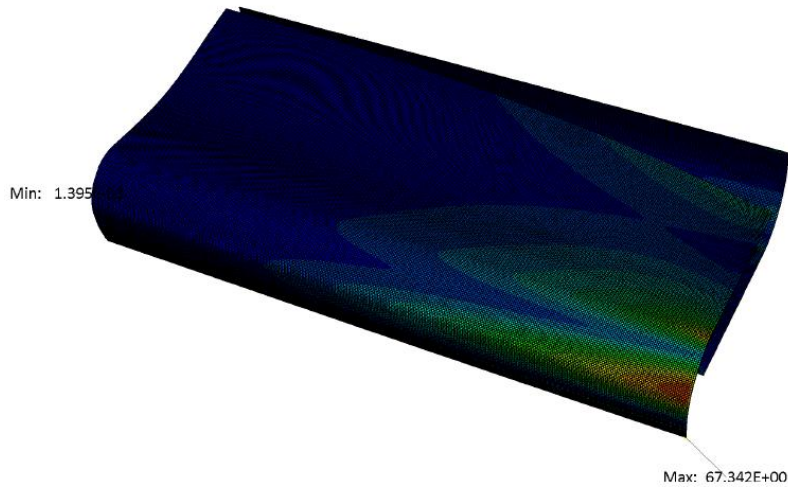


Imagen 2: Valores de esfuerzo máximo y mínimo en las palas. Fuente: ABAQUS SIMULIA

Se observa que el mayor esfuerzo soportado tiene un valor de 67,342MPa y el menor de  $1,39 \cdot 10^{-3}$ MPa. El punto que soporta el mayor esfuerzo se da en el extremo inferior de la pieza, es decir, donde se encuentra el empotramiento, y el punto que soporta el menor esfuerzo se da en el extremo superior de la pala, donde no hay restricción de movimiento.

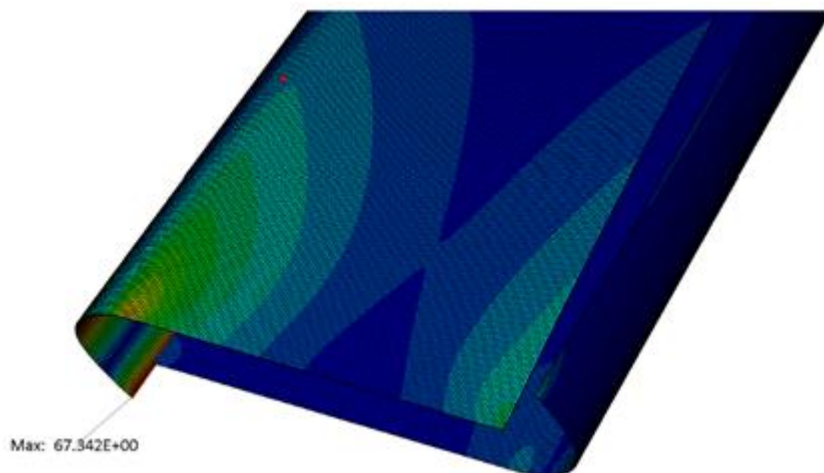
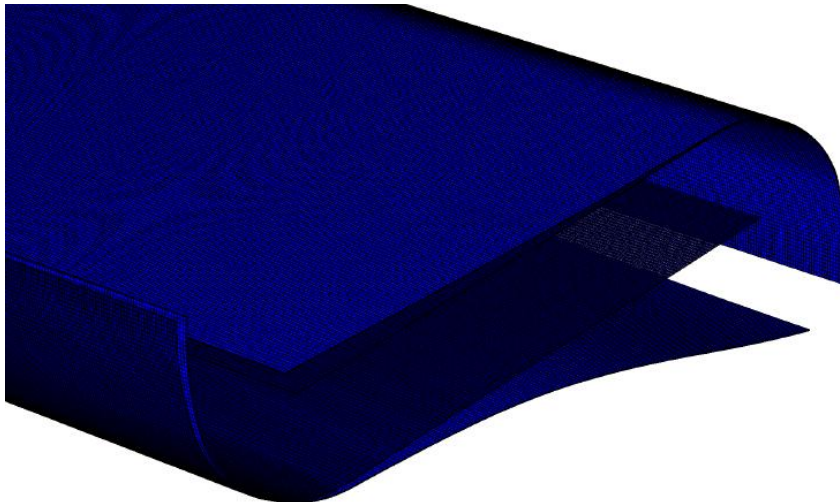


Imagen 3: Detalle del punto de esfuerzo máximo. Fuente: ABAQUS SIMULIA



*Imagen 4: Detalle del punto de esfuerzo mínimo. Fuente: ABAQUS SIMULIA*

Si se compara la estructura de las palas cuando actúan las fuerzas sobre éstas y cuando no actúan, se tiene la siguiente figura:



*Imagen 5: Comparación de las palas con y sin fuerzas aplicadas. Fuente: ABAQUS SIMULIA*

Desplazamientos

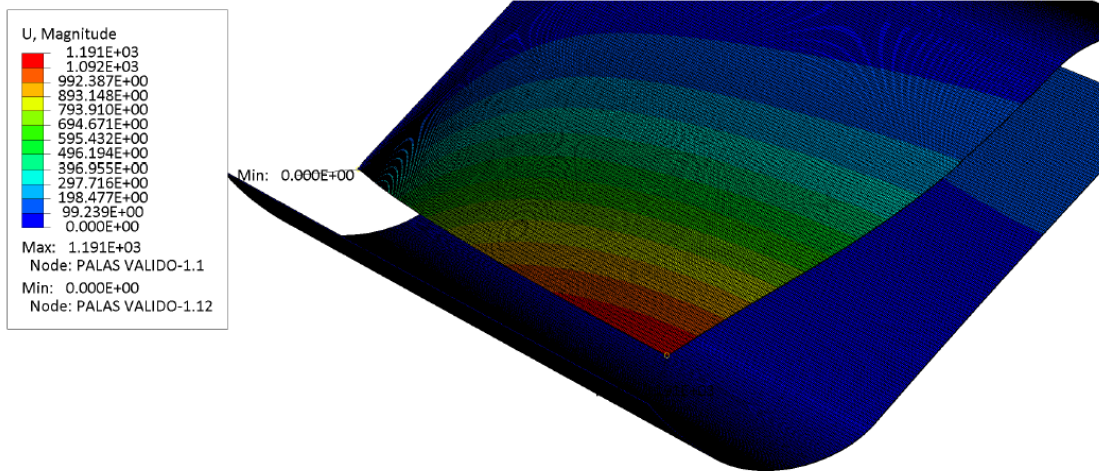


Imagen 6: Desplazamiento en las palas. Fuente: ABAQUS SIMULIA

En el caso de los desplazamientos ocurre al contrario que en los esfuerzos. El valor máximo se da en la zona donde los esfuerzos son mínimos, es decir, donde no hay restricciones de los grados de libertad, y el valor mínimo se da en la zona del empotramiento, donde los grados de libertad se encuentran restringidos.

Los resultados obtenidos muestran que la estructura de las palas adoptada tendría un funcionamiento adecuado, ya que el aluminio, con los esfuerzos a los que es sometido, no llegaría a tener deformaciones plásticas.



## ANEXO 3

### SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS

Para llevar a cabo la selección de los rodamientos se utilizan una serie de catálogos interactivos que tienen los diferentes fabricantes especificando todas las características de los rodamientos (tipo de rodamiento, capacidades de carga estática y dinámica, diámetro interno y externo,...). En este caso, se ha hecho uso de los catálogos de los rodamientos SKF.

En el caso de este proyecto se utilizan dos tipos de rodamientos. Por un lado se utiliza un rodamiento radial para soportar la fuerza del viento, y por otro lado se utilizan dos rodamientos axiales para soportar el peso de diferentes ejes y componentes de los mismos. Por ello, antes de ver las características específicas que tiene cada uno de los rodamientos que se han seleccionado, se van a explicar brevemente en qué consisten estos dos tipos de rodamientos.

#### 1. Rodamientos rígidos de una hilera de bolas

Los rodamientos rígidos de una hilera de bolas son particularmente versátiles. Su diseño es sencillo, no desarmables, son apropiados para velocidades altas e incluso muy altas y resistentes durante su funcionamiento, exigiendo muy poco mantenimiento. Las ranuras profundas de los caminos de rodadura y el alto grado de oscilación entre éstas y las bolas, permiten que los rodamientos rígidos de bolas soporten cargas axiales en ambos sentidos, además de cargas radiales, incluso a altas velocidades.

Los rodamientos rígidos de una hilera de bolas son los más utilizados. Consecuentemente, SKF los suministra en varios formatos y tamaños: rodamientos con diseño básico abierto, rodamientos obturados, rodamientos con ranura para anillo plástico,...

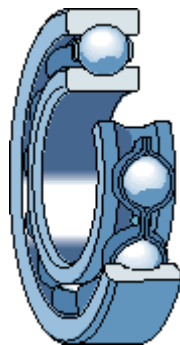


Imagen 1: Rodamiento rígido de una hilera de bolas. Fuente: [www.skf.com](http://www.skf.com)

Este va a ser el tipo de rodamiento que se utilizará en el proyecto para soportar la fuerza radial del viento en la unión superior entre el soporte tubular y la estructura de sujeción.

## 2. Rodamientos axiales de bolas de simple efecto.

Los rodamientos axiales de bolas SKF de simple efecto constan de una arandela de eje, una arandela de alojamiento y una corona axial de bolas. Los rodamientos son desarmables de modo que el montaje resulta sencillo ya que las arandelas y la corona de bolas pueden montarse por separado.

Hay tamaños más pequeños con una superficie de asiento plana en la arandela de alojamiento o con una superficie de asiento esférica. Los rodamientos con una arandela de alojamiento esférica pueden utilizarse con una arandela de asiento esférica para compensar la desalineación entre la superficie de apoyo en el alojamiento y el eje.

Los rodamientos axiales de bolas de simple efecto, como su propio nombre indica, pueden soportar cargas axiales en una dirección y por tanto fijar un eje axialmente en una dirección. No deberán someterse a ninguna carga radial.

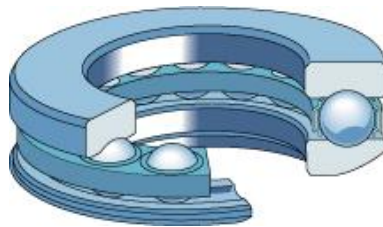


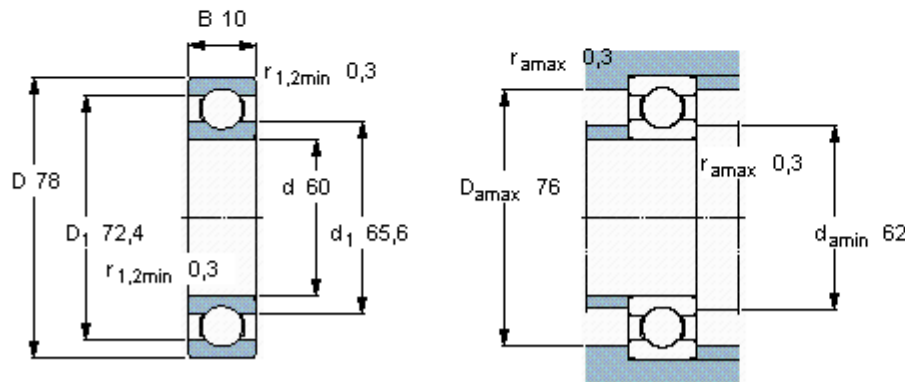
Imagen 2: Rodamiento axial de bolas de simple efecto. Fuente: [www.skf.com](http://www.skf.com)

Este tipo de rodamiento será el utilizado en el proyecto para soportar el peso del eje principal y los componentes unidos a él, y el peso del eje pequeño que sirve como fijación del estator así como el peso del propio estator.

**Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera, no están obturados**

Tolerancias , ver también el texto  
 Juego radial interno , ver también el texto  
 Ajustes recomendados  
 Tolerancias del eje y del alojamiento

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga $P_u$	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	$C_0$		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
60	78	10	11,9	11,4	0,49	17000	11000	0,11	61812



**Factores de cálculo**

$k_r$  0,015  
 $f_0$  17

Imagen 6: Características del rodamiento SKF-61812. Fuente: [www.skf.com](http://www.skf.com)

**Rodamientos axiales de bolas, de simple efecto**

Tolerancias , ver también el texto  
 Ajustes recomendados  
 Tolerancias del eje y del alojamiento

Dimensiones principales			Capacidades de carga dinámica    estática		Carga límite de fatiga	Factor de carga mínima	Velocidades Velocidad de referencia	Velocidad límite	Masa	Designación
d	D	H	C	C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	A	rpm		kg	-
mm			kN		kN	-				
40	68	19	46,8	106	4	0,058	3800	5300	0,27	51208

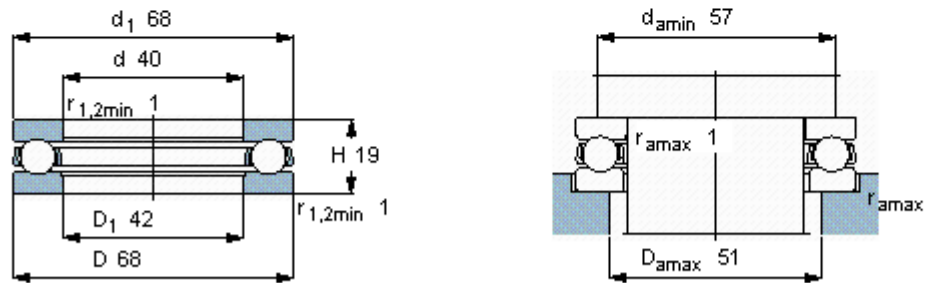


Imagen 7: Características del rodamiento SKF-51208. Fuente: [www.skf.com](http://www.skf.com)

**Rodamientos axiales de bolas, de simple efecto**

Tolerancias , ver también el texto  
 Ajustes recomendados  
 Tolerancias del eje y del alojamiento

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Factor de carga mínima	Velocidades		Masa	Designación
d	D	H	C	C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	A	Velocidad de referencia	Velocidad límite	kg	
mm			kN		kN	-	rpm			-
7	17	6	2,51	2,9	0,108	0,000044	14000	19000	0,0065	BA 7

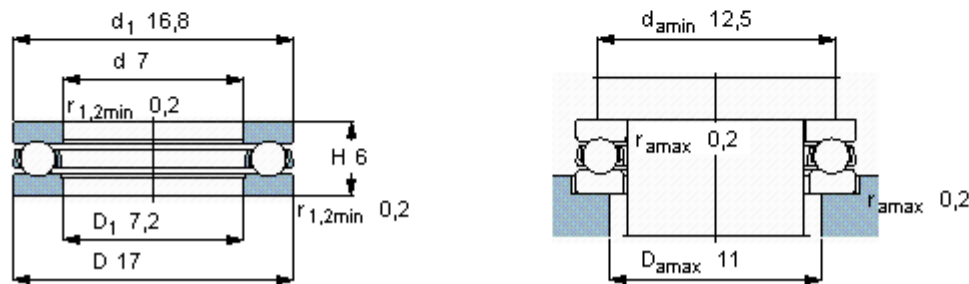


Imagen 8: Características del rodamiento SKF-BA-7. Fuente: [www.skf.com](http://www.skf.com)

## ANEXO 4

### CÁLCULO DEL PESO DEL AEROGENERADOR

El peso del aerogenerador será un aspecto importante a tener en cuenta en este proyecto, ya que todos los componentes del equipo tendrán que ser transportados hasta la comunidad de Vilacollo. En el caso concreto de Vilacollo, el acceso es bastante asequible, sin embargo, si este modelo de aerogenerador se lleva a otras comunidades, puede que sus carreteras no se encuentren en tan buen estado y por tanto, puede que el transporte resulte más complejo.

Por esta razón y también por motivos económicos, se intentará que el peso del aerogenerador sea mínimo.

A continuación se va a ir calculando de manera aproximada el peso de los elementos más importantes del equipo. Para conocer de manera exacta la geometría de los mismos se pueden consultar los planos.

#### 1. Peso de las tapas circulares.

Dimensiones	<i>Diámetro = 1,21m, espesor = 0,005m</i>
Volumen	$V = \pi D e = 0,019m^3$
Densidad	$\rho = 2700kg/m^3$
<b>Masa</b>	<b><math>m = 41,05kg</math></b>

Tabla 1: Características de las tapas. Fuente: elaboración propia

Como se tienen dos tapas, la masa de ambas será 82,11kg.

#### 2. Peso de las palas.

	<b>Parte recta</b>	<b>Parte curva</b>
Dimensiones	<i>Longitud = 0,7458m, espesor = 0,005m, altura = 2,2m</i>	$R_e = 0,165m, R_i = 0,16m, altura = 2,2m$
Volumen	$V = L \cdot e \cdot H = 0,0082m^3$	$V = 0,5\pi(R_e^2 - R_i^2)H = 0,0056m^3$
Densidad	$\rho = 2700kg/m^3$	$\rho = 2700kg/m^3$
Masa	$m = 22,15kg$	$m = 15,16kg$
<b>Masa total</b>	<b><math>m_{total} = 37,31kg</math></b>	

Tabla 2: Características de las palas. Fuente: elaboración propia

Como se tienen dos palas, la masa de ambas será 74,62kg.

### 3. Peso del eje principal.

	<b>Parte superior</b>	<b>Parte inferior</b>
Dimensiones	$R_e = 0,03m, R_i = 0,028m$ $altura = 0,3m$	$R_e = 0,02m, R_i = 0,018m,$ $altura = 0,2m$
Volumen	$V = \pi(R_e^2 - R_i^2)H = 0,00011m^3$	$V = \pi(R_e^2 - R_i^2)H = 4,77 \cdot 10^{-5}m^3$
Densidad	$\rho = 7850kg/m^3$	$\rho = 7850kg/m^3$
Masa	$m = 0,858kg$	$m = 0,375kg$
Masa total	<b><math>m_{total} = 1,233kg</math></b>	

Tabla 3: Características del eje principal. Fuente: elaboración propia

### 4. Peso del soporte tubular superior.

Dimensiones	$R_e = 0,03m, R_i = 0,028m$ $altura = 0,2m$
Volumen	$V = \pi(R_e^2 - R_i^2)H = 7,28 \cdot 10^{-5}m^3$
Densidad	$\rho = 7850kg/m^3$
<b>Masa</b>	<b><math>m = 0,572kg</math></b>

Tabla 4: Características del soporte tubular superior. Fuente: elaboración propia

### 5. Peso del sistema de transmisión

	Polea grande	Polea pequeña
Dimensiones	$D = 0,3m, espesor = 0,015m$	$D = 0,1m, espesor = 0,015m$
Volumen	$V = \pi R^2 e = 0,00106m^3$	$V = \pi R^2 e = 1,18 \cdot 10^{-4}m^3$
Densidad	$\rho = 7850kg/m^3$	$\rho = 7850kg/m^3$
Masa	$m = 8,32kg$	$m = 0,92kg$
Masa total	<b><math>m_{total} = 9,24kg</math></b>	

Tabla 4: Características del sistema de transmisión. Fuente: elaboración propia

Hay que tener en cuenta que la polea grande no se trata de un disco macizo, sino que se elimina de éste parte del material, tal y como se observa en las figuras de este sistema. De esta forma se consigue disminuir el peso del aerogenerador sin que esta eliminación del material suponga un cambio en el funcionamiento del mismo.

Por ello, considerando que se elimina aproximadamente la mitad del material del disco, el peso total del sistema de transmisión no será 9,24 sino 5kg.

### 6. Peso del generador eléctrico.

	<b>Rotor</b>	<b>Estator</b>	<b>Imanes</b>	<b>Bobinado</b>	<b>Eje unión con polea</b>
Dimensiones	$D = 0,2m,$ <i>espesor</i> $= 0,01m$	$D = 0,18m,$ <i>espesor</i> $= 0,002m$	$D = 0,03m,$ <i>espesor</i> $= 0,01m$	Longitud cable 36,6m, peso específico 14,7kg/km	$R_e = 0,01m, R_i$ $= 0,008m$ <i>altura</i> $= 0,1m$
Volumen	$V = \pi R^2 e$ $= 0,000314m^3$	$V = \pi R^2 e$ $= 5,09$ $\cdot 10^{-5}m^3$	$V = \pi R^2 e$ $= 7,06$ $\cdot 10^{-6}m^3$		$V = \pi(R_e^2 - R_i^2)H$ $= 1,131 \cdot 10^{-5}m^3$
Densidad	$\rho = 7850kg/m^3$	$\rho$ $= 1250kg/m^3$	$\rho$ $= 7000kg/m^3$		$\rho = 7850kg/m^3$
<b>Masa</b>	<b><math>m = 2,466kg</math></b>	<b><math>m = 0,06kg</math></b>	<b><math>m = 0,049kg</math></b>	<b><math>m = 0,54kg</math></b>	<b><math>m = 0,089kg</math></b>

Tabla 6: Características del generador eléctrico. Fuente: elaboración propia

En el generador eléctrico hay que tener en cuenta lo mismo que ocurre en la polea grande del sistema de transmisión, es decir, que el estator no es un disco completo, sino que hay parte que se le ha quitado material. Por tanto, consideraremos su masa 0,04kg.

De esta forma, para el cálculo del peso total del generador se consideran dos discos rotor, un estator, 20 imanes, los 36,6m de bobinado y el eje de unión del rotor superior con la polea. A este conjunto, hay que añadir el peso de la chumacera que fija el rotor inferior al suelo, considerado 1kg, y el peso del pequeño eje que mantiene el estator fijo, considerado 0,2kg. Con todo ello el peso total queda de la siguiente forma:

$$m = (2,466 \cdot 2) + 0,04 + (0,049 \cdot 20) + 0,54 + 0,089 + 1 + 0,2 = 7,78kg$$

Por tanto, el peso del equipo será:

	Peso
Tapas	82,11kg
Palas	72,62kg
Eje principal	1,233kg
Soporte tubular superior	0,572kg
Sistema de transmisión	5kg
Generador eléctrico	7,78
<b>Total</b>	<b>169,315kg</b>

Tabla 7: Peso total del equipo. Fuente: elaboración propia

A este peso total, hay que sumarle el peso de la estructura de sujeción formada por todas las barras metálicas, así como todos los tornillos, tuercas y arandelas que son necesarios para la construcción del equipo.

Como se observa, el equipo resulta bastante pesado, ya que las dimensiones de éste también son muy grandes si se quiere conseguir esa potencia determinada.



## ANEXO 5

### COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

#### 1. Baterías o acumuladores:

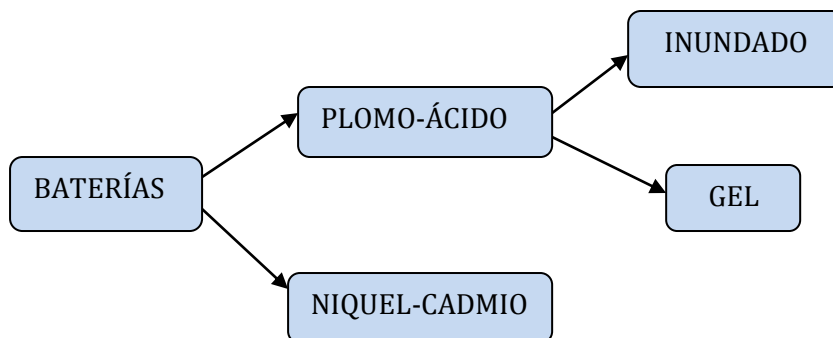
Como se observa en las diferentes tablas del capítulo 4 de este proyecto, la mayoría de la energía es consumida durante la noche, ya que es en este momento cuando es necesario proporcionar luz en los hogares. Por ello, será necesario un banco de baterías para almacenar la energía del viento, ya que no coinciden los horarios de producción de energía con los de consumo.

Las baterías son dispositivos capaces de transformar energía potencialmente química en energía eléctrica. Están compuestas por dos placas, por un lado se encuentra el ánodo (placa negativa) y por otro lado el cátodo (placa positiva). Ambas placas se encuentran sumergidas en un electrolito, donde se produce la carga y descarga eléctrica.

Las unidades de medida de almacenamiento de energía de las baterías se mide en amperios hora (A·h). Así, cuando una batería dice 100(A·h) significa que puede suministrar una corriente de 10 amperios durante 10 horas.

#### *Tipos de baterías*

Hay una gran variedad de baterías. A continuación, se van a describir dos grupos de baterías muy importantes, tanto por su eficiencia como por su accesibilidad.



Gráfica 1: Tipos de baterías. Fuente: elaboración propia

### *Baterías plomo-ácido*

Este tipo de baterías son utilizadas tanto en vehículos como en generación eólica. Suelen utilizarse las de tipo inundado, ya que resultan mejor que las de gel, económicamente hablando.

Las utilizadas en eólica se conocen como Baterías de Ciclo Profundo. También se utilizan bastante en aplicaciones fotovoltaicas, ya que se adaptan bien a cualquier corriente de carga y su precio no es muy elevado.

A continuación se comparan las baterías utilizadas en vehículos y las utilizadas en aerogeneradores.

<b>Baterías de vehículo</b>	<b>Baterías de ciclo profundo (aerogeneradores)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseñadas para suministrar mucha energía en periodos cortos de tiempo.</li> <li>• Pueden recargarse a velocidades tanto rápidas como lentas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseñadas para suministrar pequeñas cantidades de energía durante periodos largos de tiempo.</li> <li>• Se recargan únicamente a velocidades lentas.</li> </ul>

*Tabla 1: Comparación baterías plomo-ácido. Fuente: elaboración propia.*

Hay que tener especial cuidado en su utilización, ya que generan vapores.

Estas baterías normalmente dejan de funcionar cuando no hay suficiente pasta de plomo en las placas para que éste reaccione con el electrolito o por el contrario por no haber suficiente electrolito para que reaccione con el plomo.

### *Baterías níquel-cadmio*

Estas baterías son utilizadas en menor escala en el campo eólico debido a que su coste es mayor. Sin embargo, también presentan una serie de ventajas como que tienen una alta resistencia a la frecuencia de ciclos de carga y descarga, que su peso es reducido o que tiene un buen funcionamiento a bajas temperaturas.

A la hora de utilizarlas habrá que tener especial cuidado en los siguientes aspectos:

- No soldar en las conexiones, excepto si hay terminales.
- Evitar cortocircuitos, ya que pueden causar calentamiento y destrucción de las células.
- Evitar descargas excesivas debajo del voltaje final de descarga, ya que en caso de conexión en serie puede que algunas células cambien su polaridad.
- Controlar que en la recarga la polaridad sea siempre la correcta, ya que por el contrario se destruirá la batería.
- No abrir o desarmar las baterías, ni tampoco exponerlas al fuego.

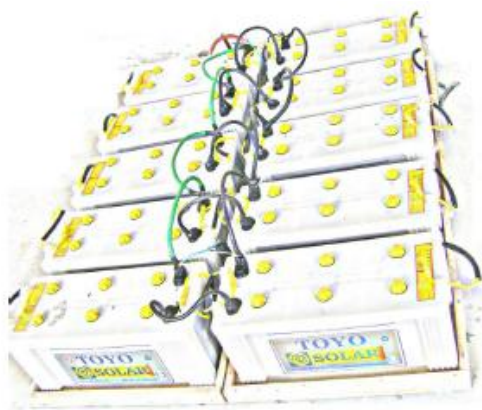


Imagen 1: Banco de baterías. Fuente: CINER

## 2. Reguladores de carga

Los reguladores de carga son elementos indispensables para el correcto funcionamiento de la instalación en cuanto a la unión del aerogenerador con la batería. Las características eléctricas que lo definen son su tensión nominal y la intensidad de corriente máxima que es capaz de disipar.

Su principal función es la de impedir que la batería continúe recibiendo energía del aerogenerador una vez que ésta haya alcanzado su carga máxima. Si se continuara introduciendo energía tras alcanzar este valor máximo, la batería podría comenzar procesos de gasificación o calentamiento que acortarían la vida de la misma, haciendo que en ciclos posteriores disminuyera la capacidad de carga de la batería.

Los equipos de regulación más modernos cuentan con elementos que suministran información sobre el estado de carga de la batería y la tensión existente en la misma. Además, van provistos de sistemas de protección como fusibles, diodos,... que sirven como prevención de daños cuando se producen excesivas cargas puntuales en el equipo.

Los equipos convencionales cuentan con sistemas de medida (voltímetros) y alarmas para prevenir la sobrecarga o la descarga excesiva. Conforme aumenta el tamaño de la instalación se va complicando el diseño de los reguladores, pudiendo incluir ordenadores,...

En el caso de este proyecto, al tratarse de una instalación pequeña se utilizarán unos reguladores que sean bastante sencillos, ya que de esta forma podrán ser utilizados por los habitantes de la comunidad y además el precio no será muy elevado.

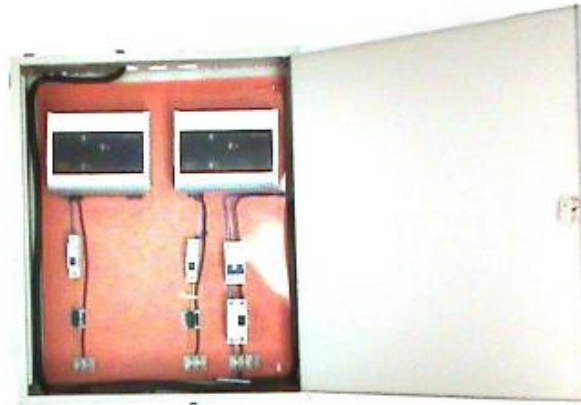


Imagen 2: Regulador de carga. Fuente: CINER

### 3. Rectificadores

La función de estos dispositivos es convertir la corriente alterna que proviene del generador eléctrico en corriente continua, para que ésta pueda ser almacenada en las baterías.

Los más utilizados son los construidos mediante diodos o tiristores.



Imagen 3: Rectificador de corriente. Fuente: CINER

#### 4. Inversores

Los inversores tienen la finalidad de adaptar las características de la corriente generada a la demanda total o parcial de las aplicaciones. En el caso de este proyecto, se tiene que las baterías trabajan en corriente continua y la demanda energética de los hogares está en corriente alterna (luz, televisión, radio,...). Por tanto, será necesaria la presencia de un inversor que transforme la corriente continua en corriente alterna.

Los inversores vienen caracterizados por su tensión de entrada, la cual debe adaptarse a la del generador, la potencia máxima que puede proporcionar y la eficiencia. La eficiencia de un inversor viene definida como la relación entre la potencia eléctrica que el inversor entrega a la salida y la potencia eléctrica que el inversor extrae del generador, es decir, la potencia de entrada. Esta eficiencia variará en función de la potencia consumida por la carga, por lo que será importante conocer dicha variación para ajustar el equipo de forma que trabaje en un punto en el que se tenga una eficiencia óptima, por encima del 70%.

En el caso de este proyecto se optarán también por equipos sencillos y que estén diseñados para aplicaciones de autogeneración.

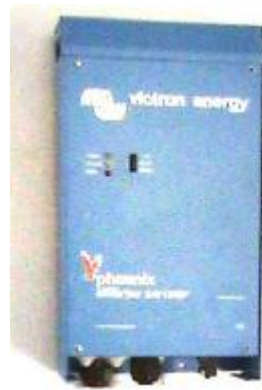
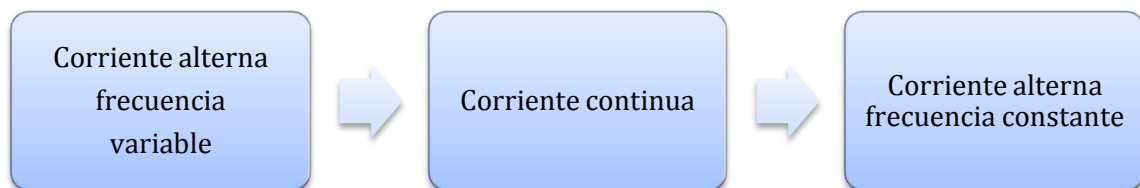


Imagen 4: Inversor CD-AC. Fuente: CINER

## 5. Variadores de frecuencia

Este componente realiza la función de pasar de una corriente que tenía una frecuencia variable a convertirla en corriente que tenga una frecuencia constante. En el caso del generador eléctrico de este proyecto, debido a que el viento es variable se consigue corriente con frecuencia variable, que habrá que convertirla en constante e igual a la de los equipos que se van a utilizar posteriormente (bombillas, televisores, radios,...). Así de esta forma, los variadores de frecuencia tienen integrado un rectificador, normalmente de diodos o tiristores, para la conversión de esta corriente alterna de frecuencia variable en corriente continua, necesaria para el posterior almacenaje en las baterías, y un inversor para volver a convertir esta corriente continua en alterna de una frecuencia constante y del valor necesario para su posterior utilización. el cual suele ser de diodos o tiristores, . Normalmente este rectificador también suele ser de diodos o de tiristores. A continuación, la corriente continua que es la que se almacenaría en las baterías, se convertida mediante un inversor, también integrado dentro del propio variador, en corriente alterna de frecuencia constante con el valor necesario para su utilización.

Por tanto, se ve que mediante la utilización de variadores de frecuencia se consiguen todos los pasos necesarios para la utilización de la energía producida por el aerogenerador.



Gráfica 1: Etapas de la corriente. Fuente: elaboración propia



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

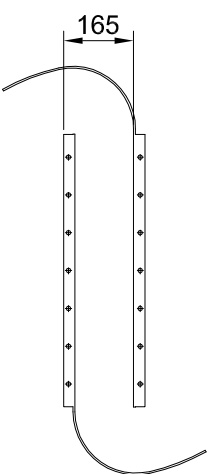
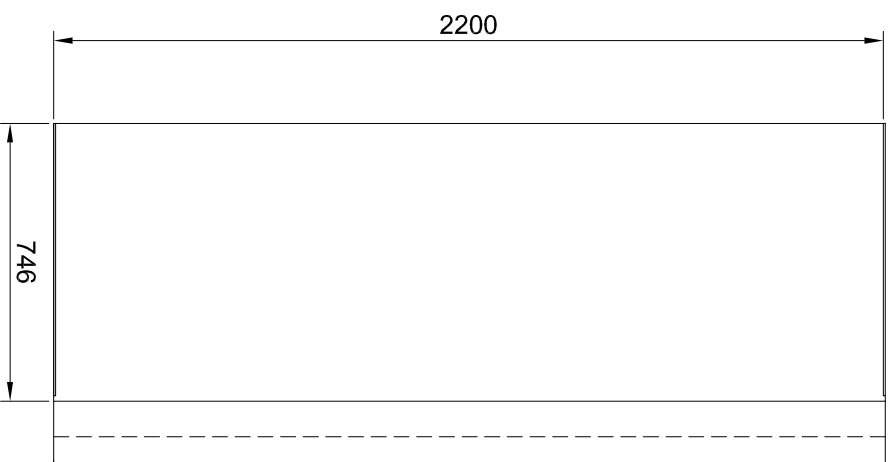
DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE  
VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA  
ELECTRIFICACIÓN RURAL

PLANOS

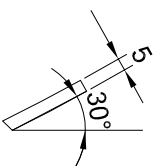
Lorena Arbeloa Sola

Jesús Zurita Gabasa

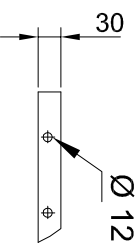
Pamplona, Julio 2012



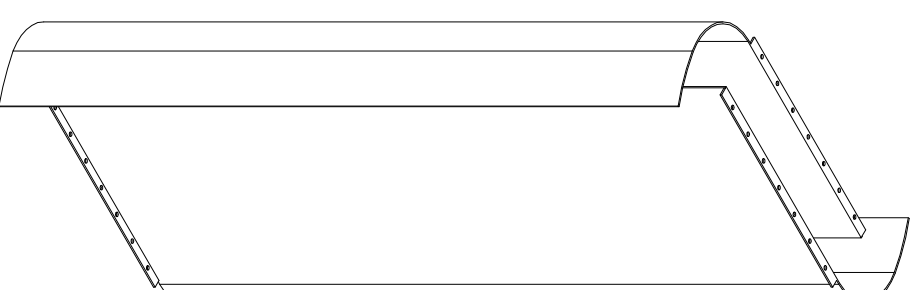
DETALLE  
MONTAJE PALAS



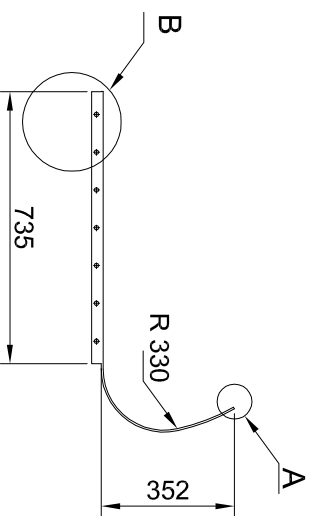
DETALLE A  
ESCALA 1:3



DETALLE B  
ESCALA 1:10



MONTAJE PALAS



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
INGENIERO  
INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES**

PROYECTO: **DISEÑO DE UN AEROGENERADOR  
DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS  
PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL**

REALIZADO:  
**ARBELOA SOLA, LORENA**

PLANO:

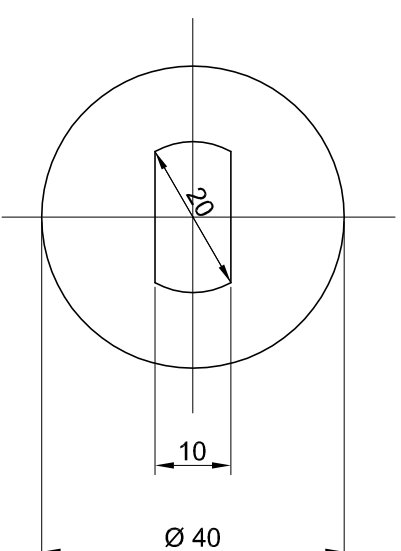
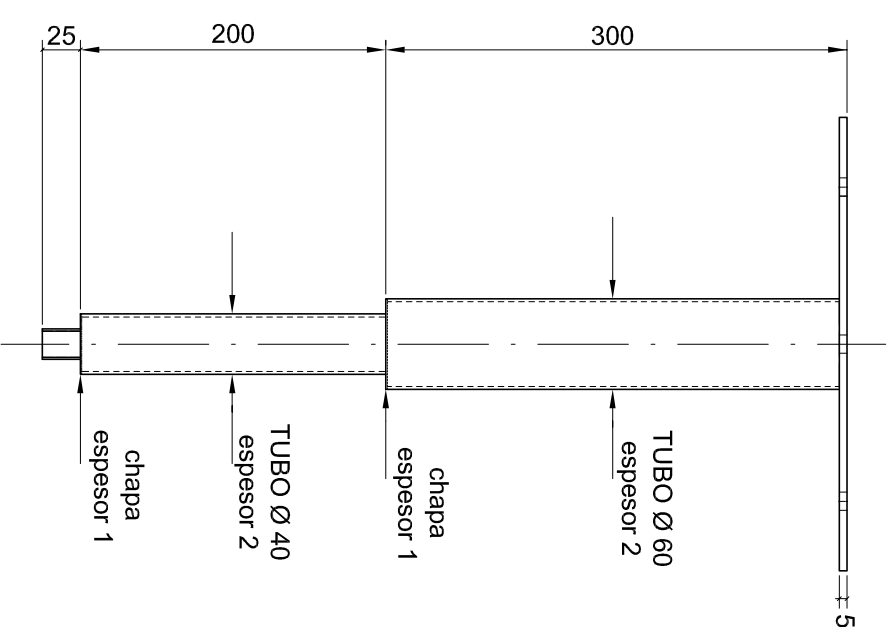
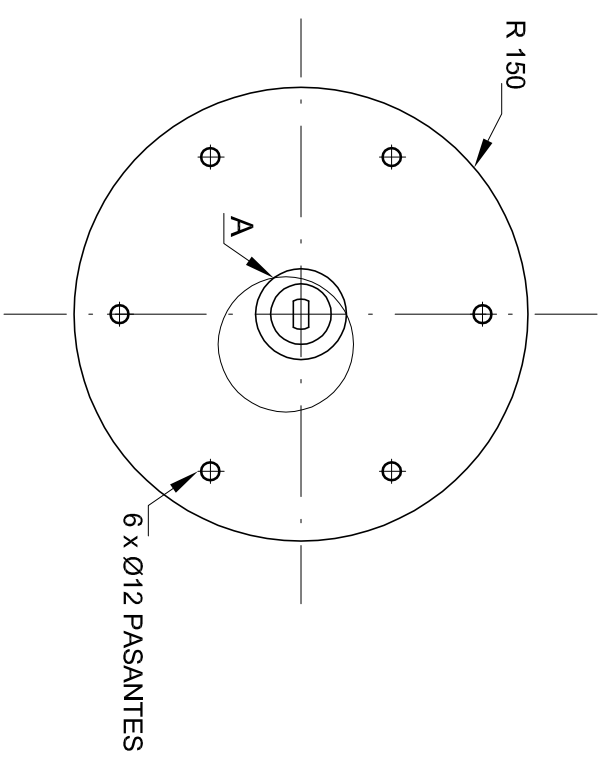
**PALA**

FECHA:  
**07/12**

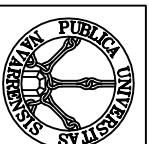
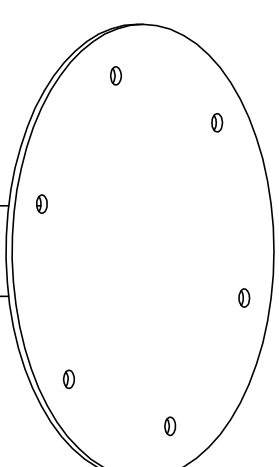
ESCALA:  
**1:20**

Nº PLANO:  
**1**





DETALLE A  
ESCALA 1:1



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
INGENIERO  
INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO:  
DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES

PROYECTO: **DISEÑO DE UN AEROGENERADOR  
DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS  
PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL**

REALIZADO:  
ARBELOA SOLA, LORENA

FIRMA:

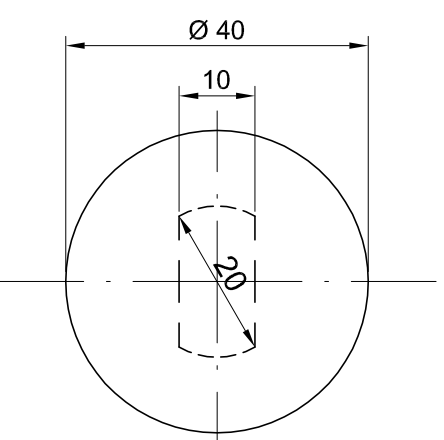
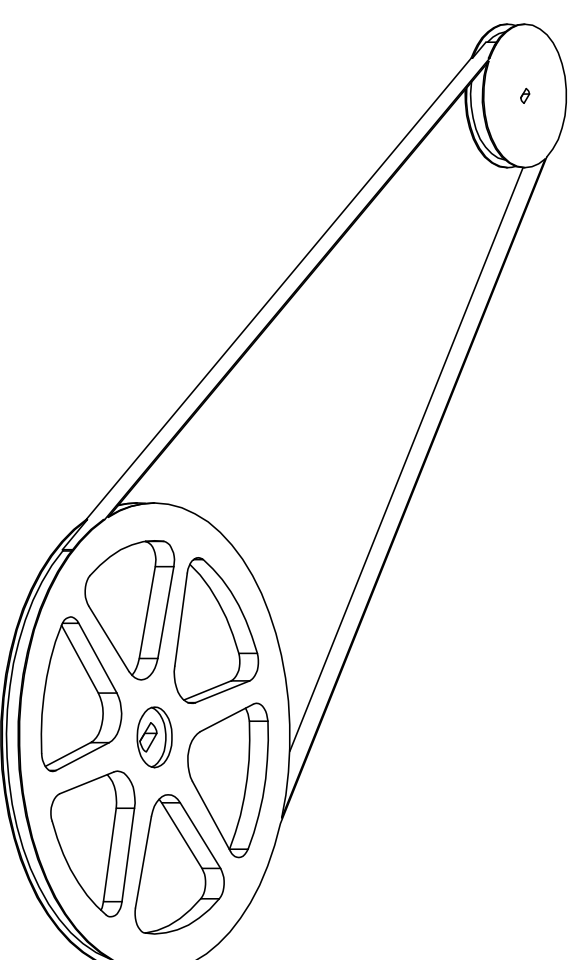
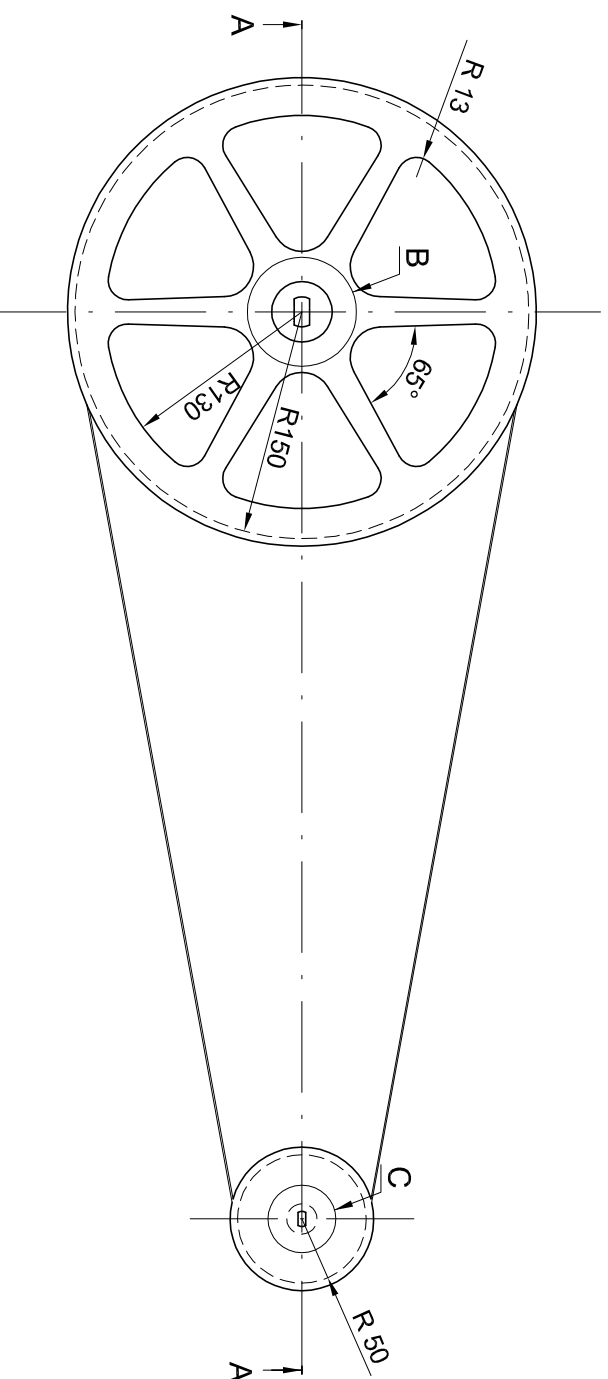
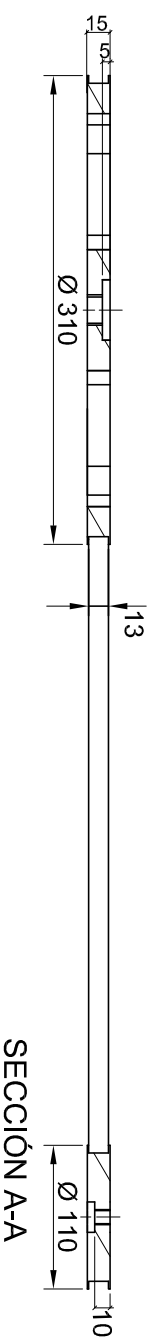
PLANO:

**EJE PRINCIPAL**

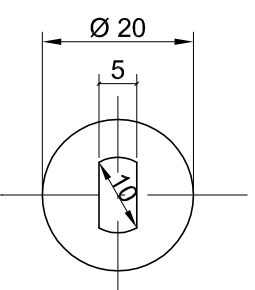
FECHA:  
**07/12**

ESCALA:  
**1:5**


Nº PLANO:  
**2**

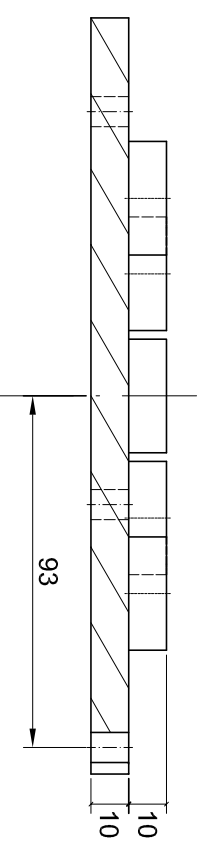
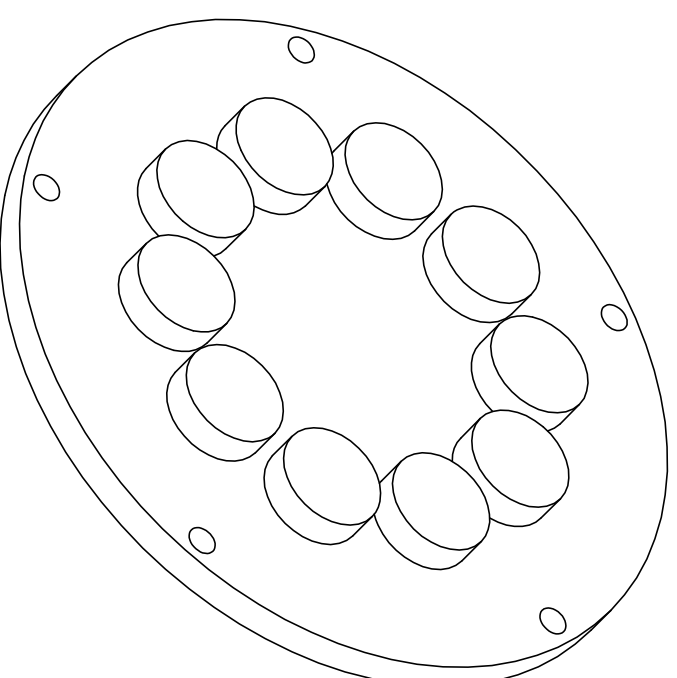
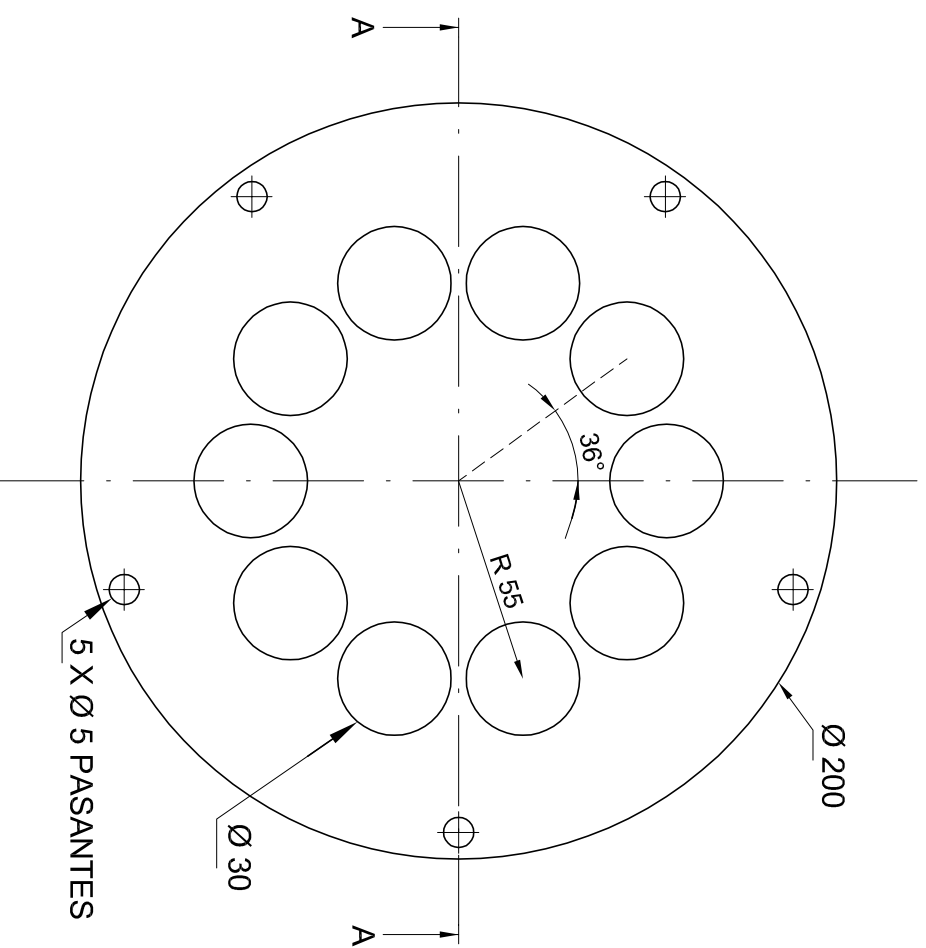


DETALLE B  
ESCALA 1:1

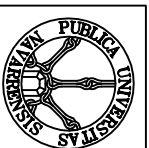


DETALLE C  
ESCALA 1:1

 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	<b>E.T.S.I.I.T.</b> INGENIERO INDUSTRIAL	DEPARTAMENTO: <b>DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES</b>	REALIZADO: <b>ARBELOA SOLA, LORENA</b>	
			FIRMA:	
PROYECTO: <b>DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL</b>	PLANO: <b>SISTEMA DE TRANSMISIÓN</b>	FECHA: <b>07/12</b>	ESCALA: <b>1:5</b>	Nº PLANO: <b>35</b>



SECCIÓN A-A



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
INGENIERO  
INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES**

PROYECTO: **DISEÑO DE UN AEROGENERADOR  
DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS  
PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL**

REALIZADO:  
**ARBELOA SOLA, LORENA**

FIRMA:

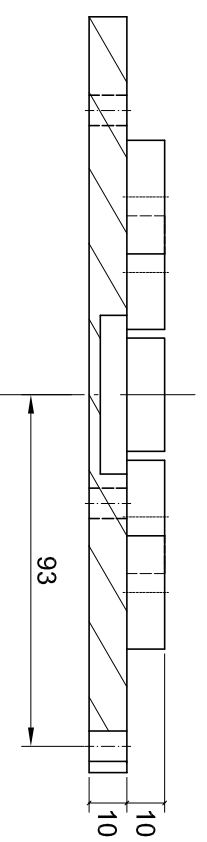
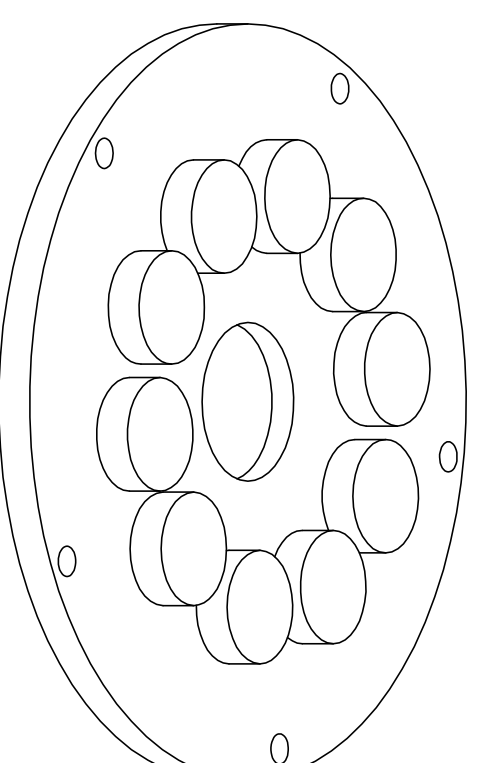
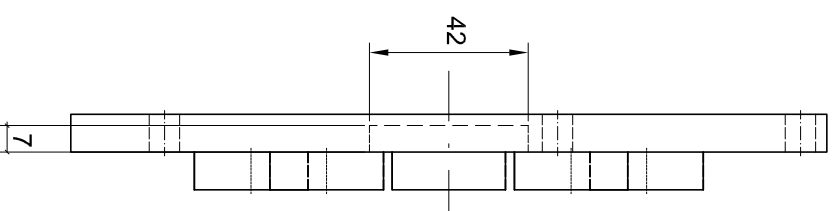
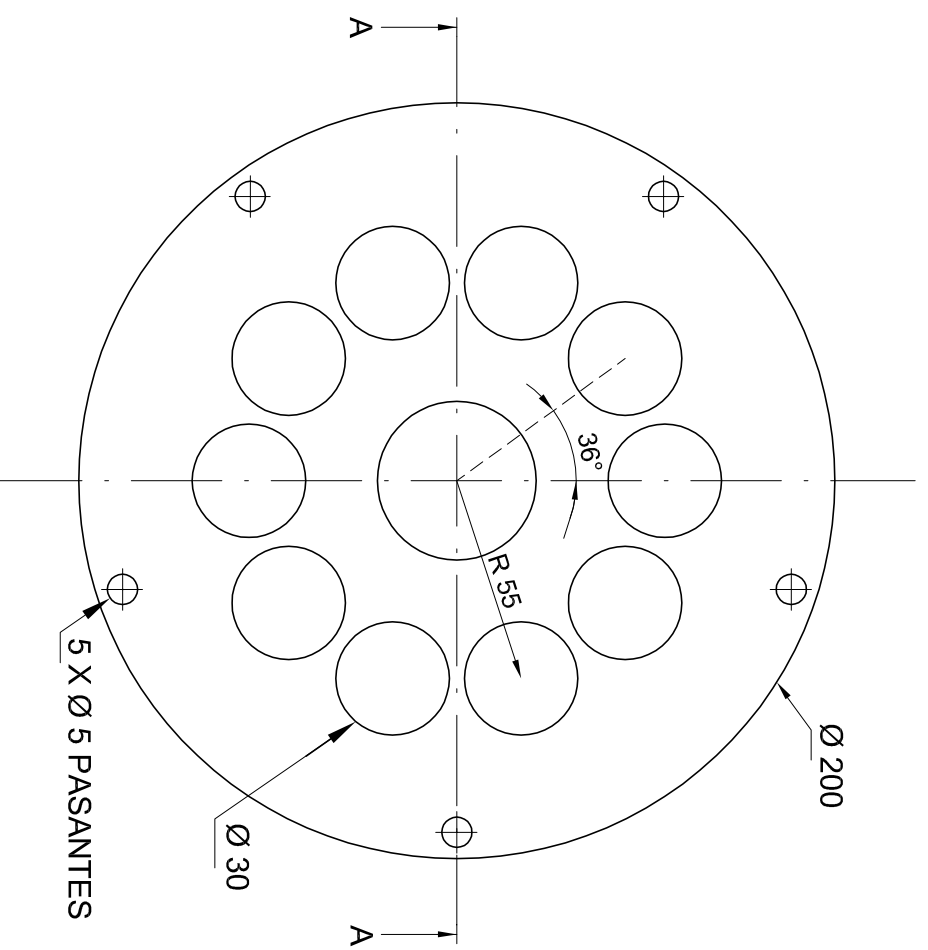
PLANO:

**ROTOR SUPERIOR DEL GENERADOR**

FECHA:  
**07/12**

ESCALA:  
**1:2**

Nº PLANO:  
**4**



SECCIÓN A-A



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
INGENIERO  
INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO:  
DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES

PROYECTO: **DISEÑO DE UN AEROGENERADOR  
DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS  
PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL**

REALIZADO:  
**ARBELOA SOLA, LORENA**

FIRMA:

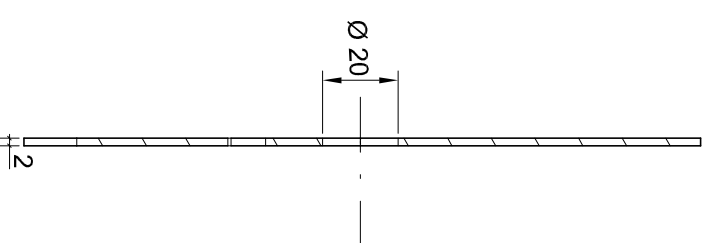
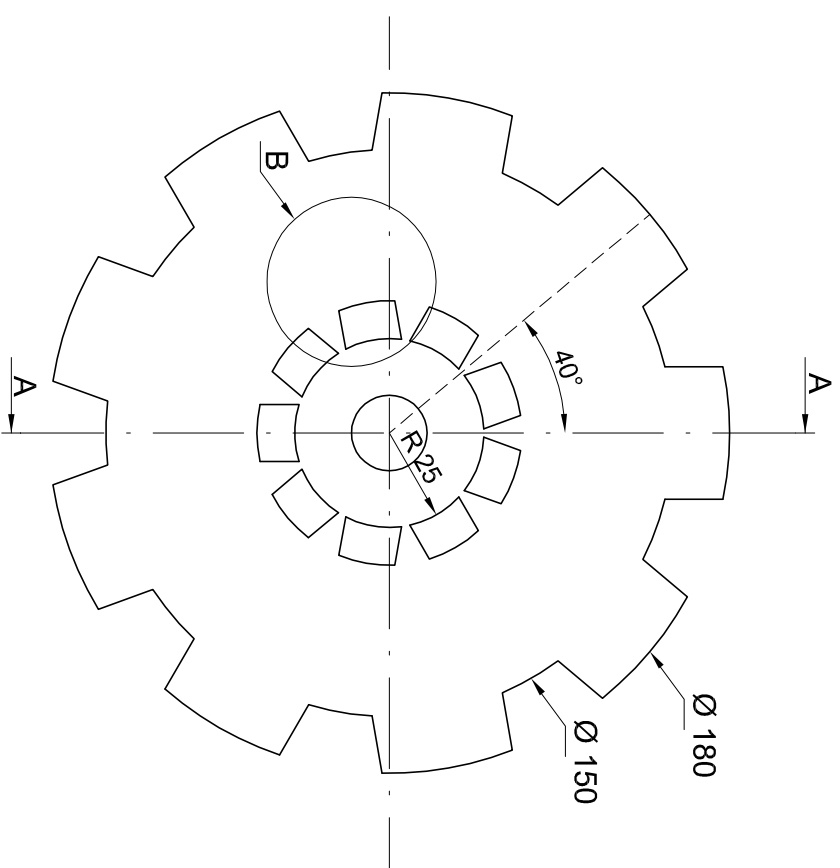
PLANO:

**ROTOR INFERIOR DEL GENERADOR**

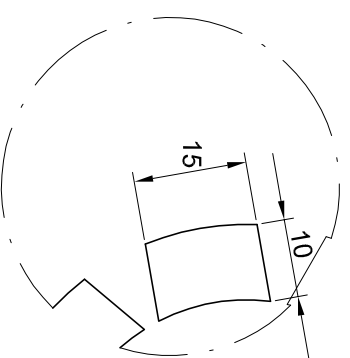
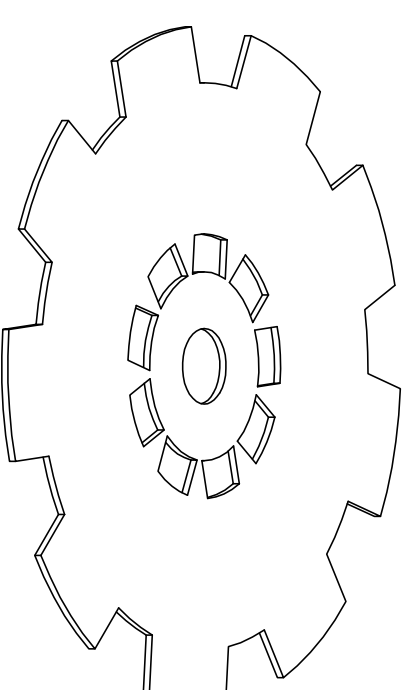
FECHA:  
**07/12**

ESCALA:  
**1:2**

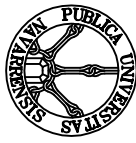
Nº PLANO:  
**5**

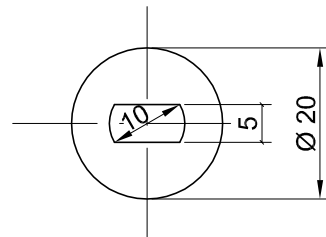
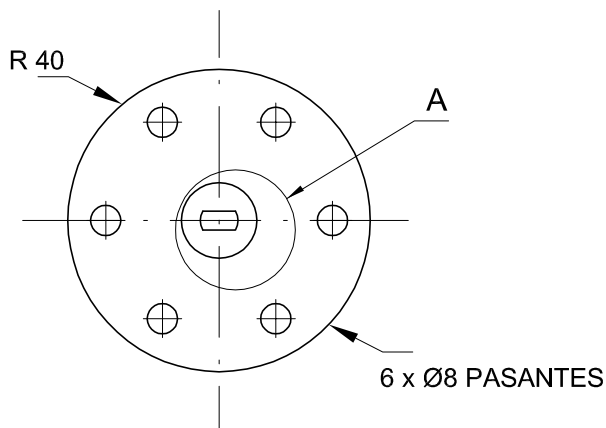
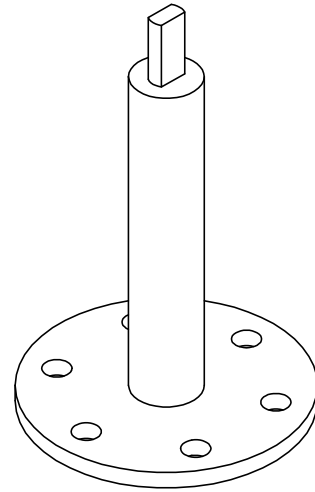
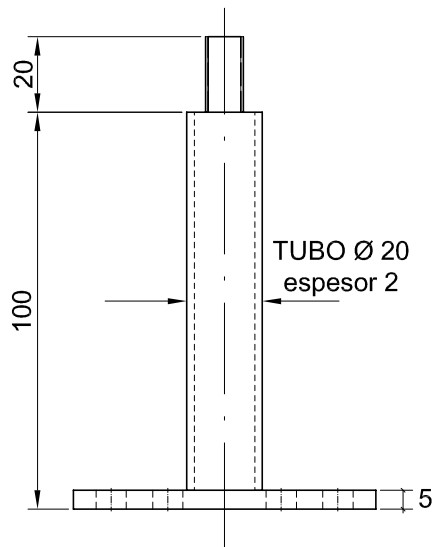


SECCIÓN A-A



DETALLE B  
ESCALA 1:1

 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	<b>E.T.S.I.I.T.</b> INGENIERO INDUSTRIAL	DEPARTAMENTO: <b>DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES</b>
	<b>PROYECTO: DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL</b>	REALIZADO: <b>ARBELOA SOLA, LORENA</b>
PLANO:  <b>ESTATOR</b>	FIRMA:	FECHA: <b>07/12</b>
		ESCALA: <b>1:2</b>
		Nº PLANO: <b>6</b>



DETALLE A  
ESCALA 1:1



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**

**INGENIERO  
INDUSTRIAL**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES**

PROYECTO: **DISEÑO DE UN AEROGENERADOR  
DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS  
PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL**

REALIZADO:  
**ARBELOA SOLA, LORENA**

FIRMA:

PLANO:

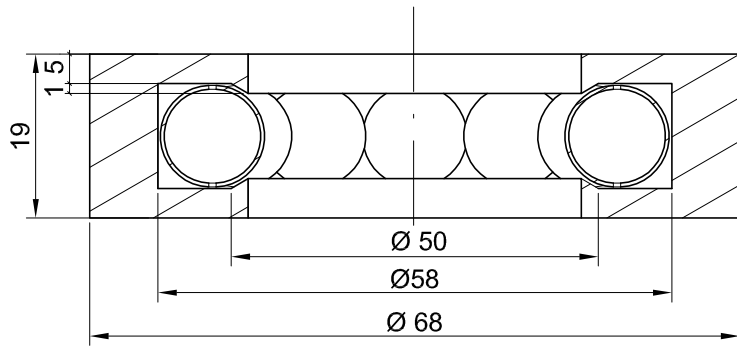
**EJE DEL GENERADOR**

FECHA:  
**07/12**

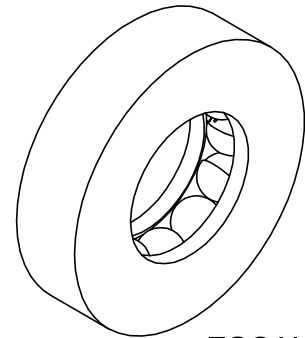
ESCALA:  
**1:2**

Nº PLANO:  
**7**

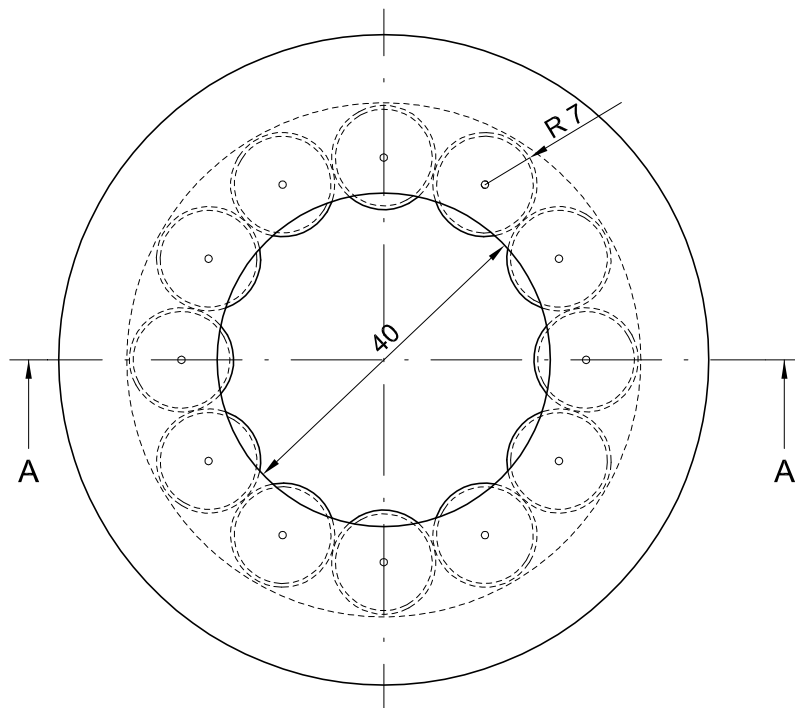
**upna**



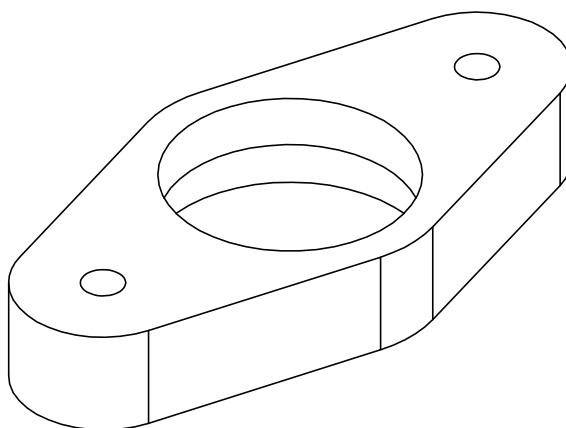
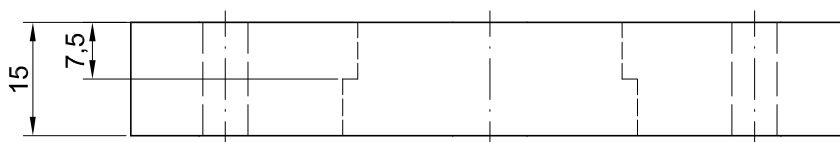
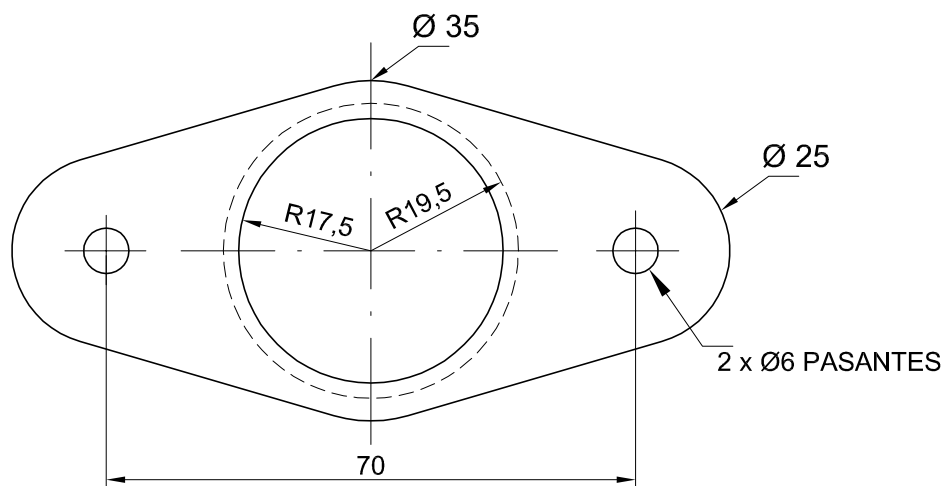
SECCIÓN A:A



ESCALA 1:2



 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	<b>E.T.S.I.I.T.</b>	DEPARTAMENTO: <b>DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES</b>		
	<b>INGENIERO INDUSTRIAL</b>	REALIZADO: <b>ARBELOA SOLA, LORENA</b>		
PROYECTO: <b>DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL</b>		FIRMA:		
PLANO: <b>RODAMIENTO AXIAL</b>	FECHA: <b>07/12</b>	ESCALA: <b>1:1</b>	N° PLANO: <b>8</b>	



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**

**INGENIERO  
INDUSTRIAL**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES**

PROYECTO: **DISEÑO DE UN AEROGENERADOR  
DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS  
PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL**

REALIZADO:  
**ARBELOA SOLA, LORENA**

FIRMA:

PLANO:

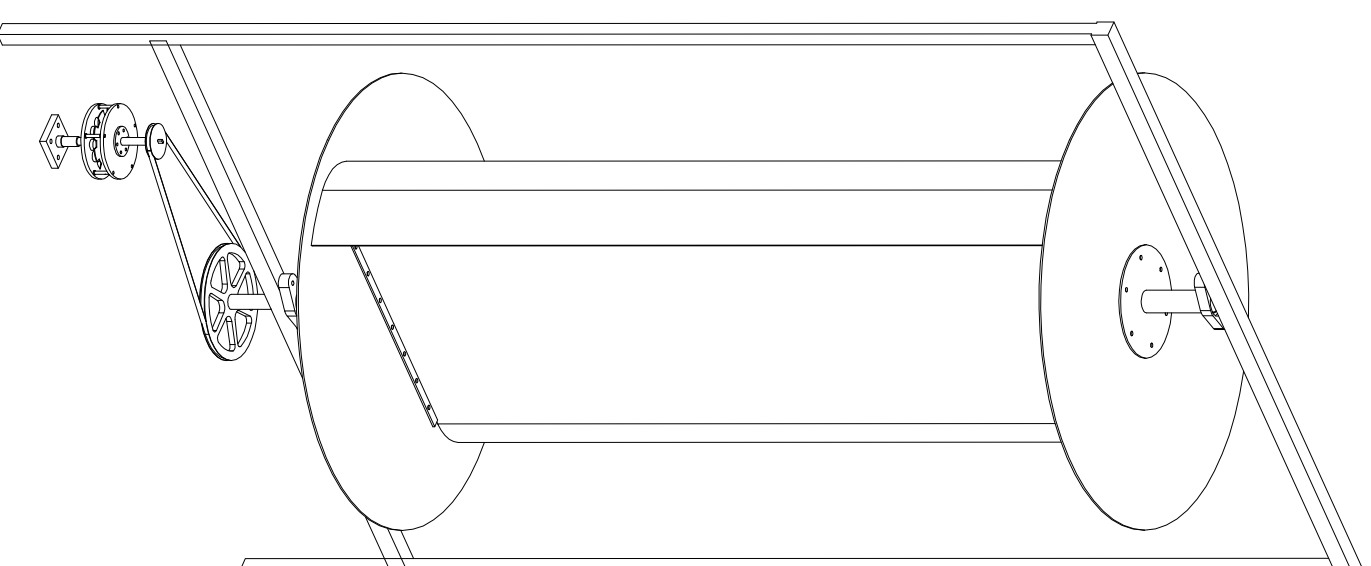
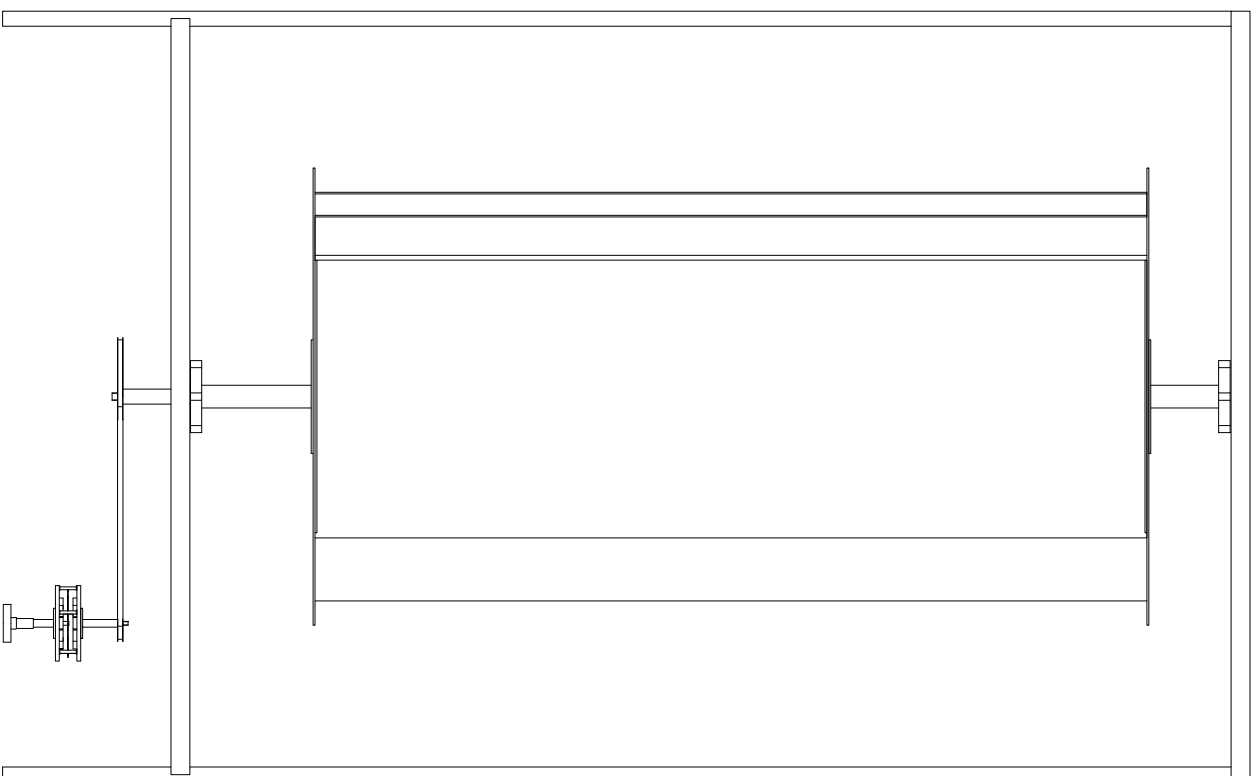
**PORTA RODAMIENTOS**


FECHA:  
**06/12**

ESCALA:  
**1:2**

Nº PLANO:  
**9**





 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	<b>E.T.S.I.I.T.</b> INGENIERO INDUSTRIAL	DEPARTAMENTO: <b>DEPARTAMENTO DE ING.          MECANICA, ENERGETICA          Y DE MATERIALES</b>
	PROYECTO: <b>DISEÑO DE UN AEROGENERADOR          DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS          PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL</b>	
REALIZADO: <b>ARBELOA SOLA, LORENA</b>	FIRMA:	DEPARTAMENTO: <b>DEPARTAMENTO DE ING.          MECANICA, ENERGETICA          Y DE MATERIALES</b>
PLANO: <b>ENSAMBLAJE</b>	FECHA: <b>07/12</b>	ESCALA: <b>1:20</b>
	Nº PLANO: <b>10</b>	