

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Trabajo de Investigación

**Diseño del rotor de un aerogenerador vertical tipo  
Savonius para la localidad de Tanaka**

José Luis Berna Huillca

Para optar el Grado Académico de  
Bachiller en Ingeniería Eléctrica

Arequipa, 2020

Repositorio Institucional Continental  
Trabajo de investigación



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **AGRADECIMIENTO**

*Este trabajo de investigación “tesina” fue realizado con mucho sacrificio y tesón, por ese motivo agradezco a DIOS, por bendecirme y darme fuerzas para culminarlo, haciendo realidad la meta que me propuse al iniciar este trabajo.*

*A la UNIVERSIDAD CONTINENTAL por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.*

*Agradezco la amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía de todas las personas que estuvieron conmigo en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas que están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias.*

*Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.*

## *DEDICATORIA*

*A mi familia, amigos y docentes que  
me instruyeron a ser un hombre de  
bien*

## RESUMEN

A nivel de mundo se viene generalizando el uso de las energías renovables, y de acuerdo a ello la generación de la Energía Eléctrica en base a energías renovables, igualmente ha ido en aumento su uso. En el Perú, existe la normalización a través del Ministerio de Energía y Minas para la promoción del uso de energías renovables y las consideraciones técnicas para su implementación.

Mediante el presente trabajo de investigación se ha podido plantear un procedimiento para la realización del diseño del rotor de un aerogenerador vertical tipo savonius, para localidades alejadas y rurales. Tomando en cuenta que, en esos sitios alejados, se tiene sistemas aislados de generación de energía eléctrica, es por esa característica que planteamos una alternativa de generación eléctrica con energías renovables, ya que las condiciones climatológicas son variadas, y en la mayoría de los sitios, se puede generar algún tipo de energía eléctrica renovable.

Se hizo los cálculos numéricos para el diseño de un aerogenerador vertical tipo savonius, para la localidad de Tanaka, con lo que se podría aplicar una solución con aerogeneradores como fuente de generación de energía eléctrica, presentando un procedimiento para la creación y evaluación de este tipo de proyectos. En zonas donde la velocidad del viento sea favorable a la implementación de este tipo de soluciones.

Palabras clave: aerogenerador vertical, generación de energía eléctrica, zonas rurales.

## **ABSTRACT**

At the world level, the use of renewable energies has been generalized, and according to this, the generation of Electric Power based on renewable energies has also increased its use. In Peru, there is standardization through the Ministry of Energy and Mines for the promotion of the use of renewable energies and technical considerations for its implementation.

By means of the present research work it has been possible to propose a procedure for the realization of the rotor design of a savonius vertical wind turbine, for remote and rural locations. Taking into account that, in those remote sites, there are isolated systems of electric power generation, it is for this characteristic that we propose an alternative generation of electricity with renewable energies, since the weather conditions are varied, and in most of the sites, some type of renewable electric power can be generated.

Numerical calculations were made for the design of a savonius vertical wind turbine, for the town of Tanaka, which could be applied a solution with wind turbines as a source of electricity generation, presenting a procedure for the creation and evaluation of this type of projects. In areas where the wind speed is favorable to the implementation of this type of solutions.

Keywords: vertical wind turbine, electric power generation, rural areas.

## INTRODUCCIÓN

En presente trabajo, pretende demostrar que el diseño de un aerogenerador, vertical tipo savonius, es una alternativa de solución a la generación de energía eléctrica en sitios aislados.

El uso de las energías renovables, como fuente de generación de energías eléctrica, se está masificando a nivel mundial y aquí en el Perú ha dado pasos agigantados, tal es el caso del impulso de generación de energía eléctrica mediante energías renovables, que, en la última década, se ha instalado centrales solares en varios departamentos del país, (Arequipa, Moquegua y Tacna), también centrales eólicas de generación eléctrica (La Libertad, Piura, Ica).

Pero esas centrales de generación de energía son relativamente grandes ya que producen potencia eléctrica superior al megavatio. Y la gran pregunta es qué hacemos con esos sitios alejados de poblaciones que solo necesitan energía eléctrica del orden de los kilowatios. No podemos aislarlos, o dejarlos de lado, a pesar que en algunos lugares se hizo la interconexión a la red nacional (conexiones costosas),

Es por eso que planteamos una alternativa de solución para generar energía eléctrica en este trabajo de investigación, en base a energías renovables y materiales relativamente sencillos de conseguir y de bajo costo.

Es así que planteamos un diseño de aerogenerador vertical tipos savonius, para sistemas aislados, para potencias de energía eléctrica debajo de los 50 kW.

Este aerogenerador tendrá que ser económico y fácil de implementar (que es lo que se quiere en el presente trabajo de investigación).

## ÍNDICE

	<b>PAGINA</b>
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	vi
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO</b>	<b>01</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	01
1.1.1 PROBLEMA GENERAL	02
1.1.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS	02
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	02
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	02
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	02
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	02
1.3.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	02
1.3.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	03
1.3.3 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	03
1.3.3.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL	03
1.3.3.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL	04
1.3.3.3 DELIMITACIÓN SOCIAL	04
1.3.3.4 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL	04
1.3.4 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	04
1.3.5 HIPÓTESIS	04
1.3.6 VARIABLES E INDICADORES	05
1.3.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTE	05
1.3.6.2 VARIABLE DEPENDIENTE	05
1.3.7 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	05
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b>	<b>06</b>
2.1 ANTECEDENTES Y BASES TEÓRICAS DE LA INVESTIGACIÓN	06
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	06
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES	07

2.2	FUNDAMENTO TEÓRICO	08
2.2.1	EL VIENTO COMO FUERZA DE LA NATURALEZA	08
2.2.2	¿QUÉ ES LA ENERGÍA EÓLICA?	09
2.2.3	LA ENERGÍA EÓLICA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE	10
2.2.4	POTENCIAL EÓLICO EN EL PERÚ	14
2.2.5	DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA	15
2.2.6	CUOTA DEL MERCADO MUNDIAL DE LOS FABRICANTES DE AEROGENERADORES	17
2.2.7	BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA ENERGÍA EÓLICA	18
2.2.8	CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS EÓLICAS	22
2.2.9	PARTES DE UN SISTEMA EÓLICO	26
2.2.10	CURVA DE POTENCIA	32
2.2.11	LA ENERGÍA EN EL VIENTO: DENSIDAD DEL AIRE Y ÁREA DE BARRIDO DEL ROTOR	33
2.2.12	DENSIDAD DEL AIRE	34
2.2.13	ÁREA DE BARRIDO DEL ROTOR	34
2.2.14	CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO	35
2.2.15	PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DEL POTENCIAL EÓLICO	36
2.2.16	VARIACIONES TEMPORALES DEL VIENTO	40
2.2.17	CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS VARIACIONES TEMPORALES DEL VIENTO	42
2.2.18	POTENCIA DE UN AEROGENERADOR EÓLICO	49
2.2.19	CLASIFICACIÓN DE AEROTURBINAS Y APLICACIONES	50
2.2.20	OBTENCIÓN DE LA POTENCIA NOMINAL DE UN AEROGENERADOR EN FUNCIÓN DE SUS PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO	52
	<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA</b>	54
3.1	METODOLOGÍA, ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL EQUIPO Y LOS MATERIALES	54
3.1.1	UBICACIÓN DEL CENTRO POBLADO DE TANAKA	55
3.2	CONDICIONES EXTERNAS A LAS QUE ESTÁ SUJETO LA PEQUEÑA CENTRAL DE GENERACIÓN EÓLICA	56
3.2.1	CONDICIONES AMBIENTALES	58
3.3	CONDICIONES INTERNAS A LAS QUE ESTÁ SUJETO EL GENERADOR EÓLICO	59
3.3.1	ALTERNATIVAS PARA LAS ASPAS Y EL ROTOR	60

3.3.2	DISEÑO DE LAS ASPAS	62
3.3.2.1	DETERMINACIÓN DE LA FORMA DE LAS ASPAS	62
3.3.2.2	DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL ROTOR	63
3.3.2.3	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN	66
3.3.2.4	FUERZA PRODUCIDA EN LAS ASPAS DEBIDO A LA ROTACIÓN	67
	<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	69
4.1	RESULTADOS, TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	69
4.1.1	RESULTADOS, ANÁLISIS DEL AEROGENERADOR EÓLICO	69
4.1.2	CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	69
4.1.3	DEFINICIÓN DEL LUGAR DE PRUEBAS DEL AEROGENERADOR	69
4.1.4	RUGOSIDAD PRODUCIDA POR EL SECTOR	70
4.1.5	CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA MÁXIMA TEÓRICA	70
4.2	CONCLUSIONES	70
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PAGINA</b>
FIG. 01. CAPACIDAD GENERADORA DE LOS PAÍSES EUROPEOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE PROCEDENCIA EÓLICA	11
FIG. 02. EVOLUCIÓN INSTALADA A NIVEL MUNDIAL	16
FIG. 03. POTENCIA INSTALADA EN EL MUNDO HASTA EL AÑO 2008	16
FIG. 04. EVOLUCIÓN ANUAL DE POTENCIA INSTALADA Y TASA DE VARIACIÓN	17
FIG. 05. FABRICANTES DE AEROGENERADORES EN EL MERCADO MUNDIAL	18
FIG. 06. MOLINO DE EJE VERTICAL DE CUATRO PALAS (MÁQUINA NEUMÁTICA)	19
FIG. 07. LOS AEROGENERADORES DE LA COUR	20
FIG. 08. MULTIPALA TIPO AMERICANO	20
FIG. 09 MOLINO DE BOMBEO MULTIPALA	22
FIG. 10. MODELOS DE AEROGENERADORES DE MEDIO Y GRAN TAMAÑO ENERGÉTICOS Y PRODUCTOR DE AGUA	24
FIG. 11. MODELOS DE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS	25
FIG. 12. AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO DARRIEUS	25
FIG. 13. AEROGENERADOR SAVONIUS CRUZADO	26
FIG. 14. COMPONENTES DE UNA AEROTURBINA	30
FIG. 15. PEQUEÑOS AEROGENERADORES Y SUS PARTES	32
FIG. 16. CURVAS DE POTENCIA DE UNA MISMA TURBINA, CON REGULACIÓN POR CAMBIO DE PASO Y CON REGULACIÓN POR PÉRDIDA AERODINÁMICA	33
FIG. 17. ÁREA DEL BARRIDO DEL ROTOR	34
FIG. 18 $F(V)$ DE WEIBULL $A=1$ ; $C=2.3$	38
FIG. 19. FORMA DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE WEIBULL $F(K, A)$ Y SU INTEGRAL $P(K, A)$ , $A = V/C$	46
FIG. 20. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA EÓLICA	48
FIG. 21. DISTINTOS TIPOS DE AEROGENERADORES	50
FIG. 22. UBICACIÓN DE LA LOCALIDAD DE TANAKA EN EL DEPARTAMENTO AREQUIPA	55
FIG. 23. LOCALIZACIÓN DE TANAKA, EN EL DISTRITO DE YAUCA	56
FIG. 24. POTENCIAL EÓLICO APROVECHABLE EN LOS DEPARTAMENTOS DEL PERÚ	57
FIG. 25. RUGOSIDAD DEL TERRITORIO PERUANO	58

FIG. 26. VELOCIDAD DEL VIENTO EN ZONAS GEOGRÁFICAS EN EL PERÚ	59
FIG. 27. TIPOS DE AEROGENERADORES DE POCA POTENCIA	60
FIG. 28. COEFICIENTE DE POTENCIA DE LOS AEROGENERADORES	61
FIG. 29 PERFILES SECCIONALES DE ALGUNOS ROTORES DE EJE VERTICAL	62
FIG. 30. ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE UN ROTOR DE ARRASTRE DIFERENCIAL	63

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>PAGINA</b>
TABLA 01: RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, SU VALOR EN GRADOS BEAUFORT, SUS EFECTOS ALTAMENTE APRECIABLES, LA DENSIDAD DE POTENCIA, LA ENERGÍA A LO LARGO DE UNA AÑO Y LA PRESIÓN DINÁMICA $\rho V^2/2$	36
TABLA 02: RANGOS DE RUGOSIDADES	40

# **CAPITULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El presente documento se realiza bajo la motivación de dar la importancia de las fuentes de energía alternativas para suplir la falta de energía en localidades aisladas del área rural de nuestra región, la misma que es reincidente en otras partes de nuestro territorio, para nuestro estudio planteamos en la localidad de Tanaka, Provincia de Caravelí – Arequipa, siendo la potencia proyectada de **8 kW**, debemos también, tener en cuenta que antes debemos realizar el estudio sobre el potencial eólico de la localidad de Tanaka.

El problema en común de estas localidades es que están alejadas y aisladas de la redes primarias y secundarias del sistema interconectado.

Es por esta razón que proponemos proveer de electricidad a estas localidades canalizando a nuestro favor las condiciones medio ambientales de la zona que en nuestro caso es la fuente de energía Eólica.

Para la formulación del Problema tomaremos aspectos de forma general y forma específica.

### **1.1.1 PROBLEMA GENERAL**

¿Se podrá diseñar un aerogenerador vertical tipo savonius para la localidad de TANAKA?

### **1.1.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

- ¿Se podrá determinar el Diseño de un aerogenerador como alternativa para el abastecimiento energético en zonas del área rural donde sean favorables las condiciones medio ambientales?
- ¿El diseño del aerogenerador, proveerá la energía eléctrica demandada en la localidad de Tanaka?

## **1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Plantear una Diseño de un aerogenerador vertical tipo savonius, para la localidad de Tanaka, para que de esta forma se puedan abastecer de Energía Eléctrica a la localidad.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el diseño de un aerogenerador vertical tipo savonius, para la localidad de Tanaka.
- calcular la potencia generada del aerogenerador vertical tipo savonius, para la localidad de Tanaka.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Debido a que no existe un método generalizado para el diseño de aerogeneradores, se busca un diseño que sea económico y con materiales que puedan generar la potencia requerida.

Justificamos el problema planteado mediante el planteamiento de una propuesta de diseño y construcción de un aerogenerador vertical tipo savonius, adecuado para la potencia requerida.

De acuerdo a la información brindada por SEAL (sociedad eléctrica de Arequipa, limitada), la provincia de Caraveli, es un sistema aislado, y no cuenta con interconexión a la red eléctrica nacional, por lo que plantear una solución a las demandas energéticas en la localidad de Tanaka, está ampliamente justificado, ya sea como la fuente principal de energía o como una fuente de energía alternativa, cuando la fuente de energía primaria no pueda abastecer la demanda de energía eléctrica en la localidad.

Sabemos por información de SEAL (sociedad eléctrica de Arequipa limitada), que la provincia de Caraveli, tiene un consumo promedio de 225 kW (SEAL, 2010), de los cuales aproximadamente la localidad de Tanaka consume alrededor de **8 kW**.

### **1.3.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

Damos la importancia de este trabajo de Investigación por la generación de fuentes alternativas de energía eléctrica y su impacto en la calidad de vida de las localidades de las áreas rurales donde las condiciones medio ambientales sean favorables a la generación de energía eléctrica.

### **1.3.3 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.3.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL**

Una de las dificultades encontradas es que las autoridades prestan poca importancia a este tipo de fuente de generación de energía eléctrica, es la ubicación del lugar, donde las condiciones de los vientos son las más favorables para la generación de energía eléctrica por el sistema eólico.

La velocidad e intensidad de los vientos en sus distintas temporalidades, ya que las mismas no son constantes.

### **1.3.3.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL**

Otro aspecto a tomar en cuenta y que nos dificulta y crea sus limitantes son las temporalidades estacionales a lo largo del año, ya que la velocidad e intensidad de los vientos no son contantes en las zonas designadas en cuestión.

### **1.3.3.3 DELIMITACIÓN SOCIAL**

Como otra limitante que encontramos para nuestros sistemas de generación eólica es el poco conocimiento de las poblaciones de las localidades de las áreas rurales donde pretendemos abastecer de fuentes de energías alternativas (sistema de generación eólico).

### **1.3.3.4 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL**

El presente proyecto tiene una delimitación en la localidad donde las condiciones medio ambientales sean favorables ya que es dependiente de variables relacionadas a los vientos.

### **1.3.4 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN**

Con la sustentación de la Metodología que mostraremos en el presente trabajo de investigación, demostramos la viabilidad del proyecto, basados en los estudios sobre el potencial eólico del área rural de la localidad en estudio, donde las condiciones medio ambientales sean favorables y debido a que el sistema de generación eólica es el más económico del mercado es que proyectamos la viabilidad de nuestra investigación.

### **1.3.5 HIPÓTESIS**

Considerando la Metodología para el diseño del pequeño sistema de generación eólico además de los parámetros medioambientales según estudio del potencial eólico en el área rural objetivo según las entidades especializadas, se debería poder determinar la generación del sistema de energía eólica como fuente alternativa de generación de energía.

### 1.3.6 VARIABLES E INDICADORES

#### 1.3.6.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

Como variables independientes consideramos:

Variable Físicas

- Longitud de palas del rotor
- Potencia del aerogenerador

Variables Medioambientales

- Temperatura del ambiente
- Precipitaciones del ambiente

Variables Geográficas de la Zona

- Altitud sobre el nivel del mar.

#### 1.3.6.2 VARIABLES DEPENDIENTES

Como variables dependientes consideramos:

Variables Geográficas de la Zona

- La velocidad del viento.
- La dirección del viento.

#### 1.3.7 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE INDEPENDIENTE	SUB VARIABLE	INDICADORES
- Físicas - Medioambientales - Geográficas	-Longitud de Palas del aerogenerador	-Metros -KW/HP
	-Temperatura Ambiente -Precipitaciones	-Grados Centígrados -mm o l/m <sup>2</sup>
	-Altitud	-msnm
VARIABLE DEPENDIENTE	SUB VARIABLE	INDICADORES
- Medioambientales	-Velocidad del Viento -Dirección del Viento	- Km/h -Norte, Sur, Este, Oeste

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES Y BASES TEÓRICAS DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES**

**Lorena Arbeloa Sola Y Jesús Zurita Gabasa (España, 2012)**, en “**Desarrollo de diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo savonius Para Electrificación Rural**”, nos dice que: el diseño del aerogenerador savonius que se planteó en zonas rurales, como alternativa de solución, intenta dar solución a dicho problema de una manera sencilla.

También concluye que, un rotor Savonius, que comúnmente es utilizado para el bombeo de agua, también puede servir para la generación eléctrica.

Enfatiza que el principal inconveniente de este tipo de rotor, tiene un coeficiente de potencia tan pequeño, y por eso las dimensiones del equipo serán bastante grandes y sería complicado fabricar aerogeneradores Savonius de mayor potencia.

**Luis Vinicio Cueva Barraqueta (Quito, 2015)**, en “**Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 watts**”, llega a la siguiente afirmación:

Escogió el rotor Savonius, tipo original, porque este le permitía usar la menor cantidad de material en su fabricación, de modo que permitía ligereza y que a su vez permitía construir un diseño simple y económico.

Afirman que el generador eólico de eje vertical tipo Savonius requiere una construcción más simple en comparación a los diferentes tipos de generadores eólicos de eje horizontal, por esta razón se pueden usar materiales como el acrílico que han permitido ligereza y resistencia para su construcción, funcionamiento y mantenimiento

Nos afirma que hay que poner especial énfasis en la orografía y los bosques donde se va a instalar el generador eólico, porque afectan a la potencia eólica disponible a la velocidad del viento y a su regularidad, lo que conlleva a un estudio minucioso para la instalación de generadores eólicos con el fin de obtener la máxima potencia eólica.

Afirma que los generadores eólicos tipo savonius y los otros equipos usados la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, permiten simplicidad en la instalación, manejo y mantenimiento de los mismos y por ende del generador eólico; esto ratifica lo mencionado en cuanto a un análisis costo – beneficio para la obtención de energía eléctrica proveniente del viento.

## **2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES**

**Michelle Stefanie Wong García (Lima, 2015) en “Diseño de un aerogenerador vertical Savonius-curvado para ensayos experimentales con velocidades de 4 m/s a 8 m/s”,** enfatiza que para un buen diseño de un aerogenerador vertical tipo savonius, debe de cumplir con todas las recomendaciones de los ensayos experimentales publicados por los investigadores en revistas de investigación.

Las dimensiones del rotor para este modelo deben ser de altura 460 mm, el diámetro del alabe 76 mm, el ángulo de inclinación del alabe: 15° 3, el rotor deberá fabricado en acero A 36 con planchas de 1 mm de espesor y ensamblado por medio de soldadura de punto 4. el eje del rotor deberá ser diseñado a torsión.

Por lo general, el trabajo de investigación recomienda seguir todos los consejos de anteriores investigadores en la materia.

## **2.2 FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **2.2.1 EL VIENTO COMO FUERZA DE LA NATURALEZA**

La energía eólica es una energía indirecta del sol, es decir, proviene del sol. Alrededor de un 1 a un 2 por ciento de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica. La energía eólica es la obtención de energía eléctrica a través de la energía mecánica generada por la velocidad del viento.

Es una energía renovable cuyas ventajas son: ser económica, ser inagotable y no produce impactos negativos sobre el medio ambiente. La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierras.

La energía eólica ha sido un recurso empleado desde tiempos remotos en diferentes partes del mundo y para diversos propósitos en especial a la navegación, en la actualidad, se necesita una velocidad de unos 8 m/s para que resulte eficaz la utilización de aerogeneradores para la producción de energía y recientemente se aplica a la producción de agua utilizando un proceso de condensación siendo su único combustible el aire (viento). En el diseño de un aerogenerador se necesita hacer un estudio de vientos globales, geostróficos, locales, de montaña; también se necesita hacer mediciones con anemómetros y utilizar la rosa de los vientos y el atlas de viento. EE.UU. sigue siendo líder en cuanto a explotación y uso de energía eólica, debido a las importantes inversiones realizadas en los 80 y 90 aunque haya disminuido fuertemente en los últimos años. Hoy en día la energía eólica es una energía madura, se puede conseguir en el mercado aerogeneradores de hasta 1

MW de potencia como tecnología probada, aerogeneradores que trabajan a velocidades bajas de viento.

El viento es aire en movimiento, tanto horizontal como vertical. Generalmente se suele aplicar a la corriente de aire que se desplaza en sentido horizontal propio de la atmósfera; los movimientos verticales, o casi verticales, se llaman corrientes. Los vientos se producen por diferencias de presión atmosférica, atribuidas, a diferencias de temperatura.

La velocidad del viento provoca que la evaporación en la superficie oceánica se intensifique rápidamente y esto hace que se eleve la energía en la atmósfera; esta energía aumentada genera las tormentas; a medida que avanzan las tormentas aumenta la evaporación, lo que proporciona más energía para gestar más tormentas, este proceso de regeneración de energía es uno de los factores de la formación de las catastróficas tormentas tropicales llamadas “Huracanes”, en el *Océano Atlántico* y “Tifones” en el *Océano Pacífico*.

Las variaciones en la distribución de presión y temperatura se deben, en gran medida, a la distribución desigual del calentamiento solar, junto a las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas cuando las temperaturas de regiones adyacentes difieren, el aire más caliente tiende a ascender y su lugar es ocupado por masas de aire más frío y más denso. Los vientos generados de esta forma suelen quedar muy perturbados por la rotación de la Tierra. Así se establece una doble corriente de aire, cuya velocidad es mayor mientras mayor sea la diferencia de temperatura entre las capas.

### **2.2.2 ¿QUÉ ES LA ENERGÍA EÓLICA?**

Es la energía que podemos obtener de la fuerza del viento o también la energía eólica es la energía cinética presente en las corrientes de aire o viento.

Para el aprovechamiento energético del viento es esencial realizar una valoración energética del recurso disponible en una localidad y una caracterización de su comportamiento. Las estimaciones del recurso eólico se basan en algunas estrategias útiles como son la colección de información de manera empírica, anemómetros totalizadores, por factores de correlación o por adquisición de datos en tiempo real. La información empírica se recoge con base en visitas realizadas al lugar, donde se examinan las características de topografía y vegetación; se indaga el conocimiento de los habitantes de la región con el fin de obtener información valiosa en la identificación de lugares con alto nivel de velocidad de viento. Por ejemplo, la constante incidencia del viento en los árboles a lo largo del tiempo, o sobre la vegetación, hace que estos crezcan inclinados en la dirección predominante desde donde sopla el viento.

Análogamente, la presencia de algunos molinos de viento, instalados de años atrás dan un verdadero indicio de que el lugar presenta un régimen adecuado de viento, para profundizar en su evaluación. Es claro que la información empírica, así recogida, no permite conocer un valor aproximado de velocidad promedio anual del viento, pero sí permite prospectar sitios para evaluación futura del recurso.

### **2.2.3 LA ENERGÍA EÓLICA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE**

“La energía eólica supone actualmente una fuente de energía renovable, competitiva con otras fuentes de energías renovables e incluso con las tradicionales no renovables. Según datos del Consejo Eólico Mundial (Global Wind Energy Council. GWEC), la nueva potencia eólica instalada en 2009 llegó a los 37,5 GW, con lo que la cifra acumulada llega a los 157,9 GW. A pesar de la crisis global la eólica creció en el año 2009 un 31%” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“La tercera parte de la nueva potencia se instaló en China, que desplazó del tercer puesto a España” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

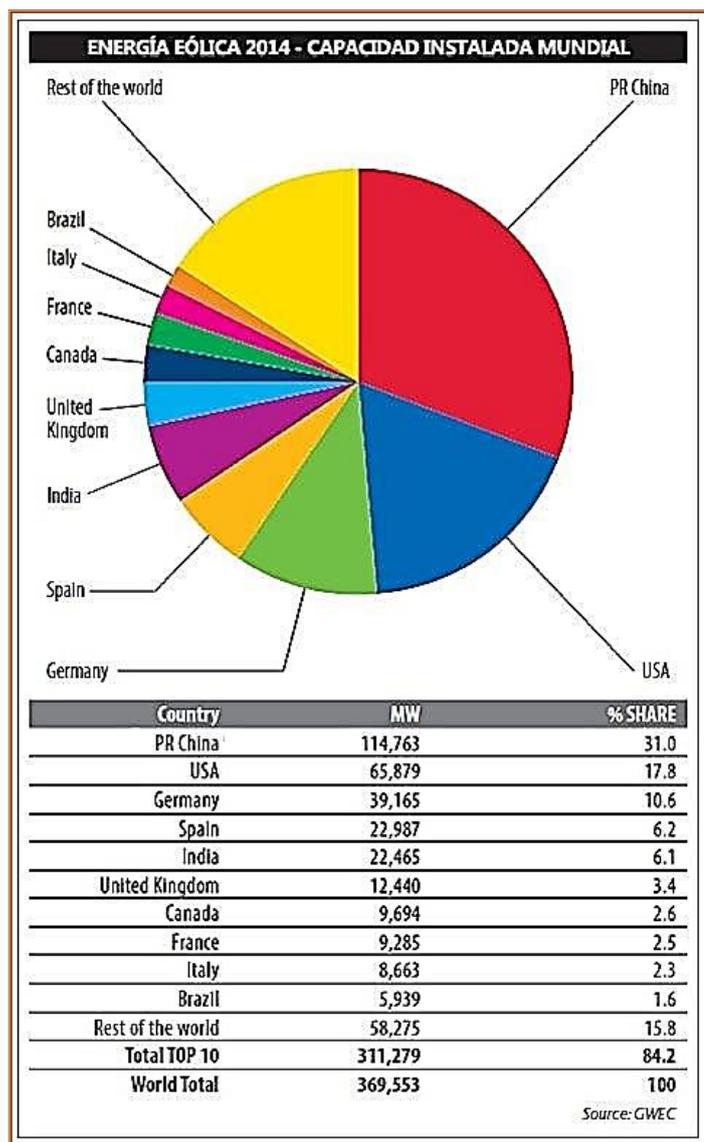


Fig. 01. Capacidad generadora de los países de energía eléctrica de procedencia eólica, año 2014.  
Fuente: GWEC

Como se puede apreciar la energía eólica se ha convertido de un tiempo hasta esta parte, en una fuente importante de generación de energía en todo el mundo, con una capacidad global de más de 600 GW en 2018. La construcción de nueva energía eólica varía de año en año y por región; Europa, por ejemplo, vio una reducción del 32% en la capacidad eólica en 2018 en comparación con 2017.

Pero que países están en el top de generación eólica, a continuación, describimos los 10 países top de generación eólica en el año 2020.

### **China – capacidad instalada 221GW**

China es el líder mundial en energía eólica, con más de un tercio de la capacidad mundial.

Cuenta con el parque eólico terrestre más grande del mundo en la provincia de Gansu, que actualmente tiene una capacidad de 7.965 MW, cinco veces más que su rival más cercano.

Los aerogeneradores del parque eólico actualmente operan solo al 40% de su capacidad, con 13.000 MW adicionales para ser instalados, lo que lleva a un total de 20.000 MW (20GW) en 2020. Se espera que esta expansión cueste \$ 17.5 mil millones.

### **US – capacidad instalada 96,4 GW**

EE. UU. Ocupa el segundo lugar con 96,4 GW de capacidad instalada y es particularmente fuerte en energía eólica terrestre.

Seis de los 10 parques eólicos terrestres más grandes se encuentran en los EE. UU. Estos incluyen el Centro de Energía Eólica en California, el segundo parque eólico terrestre más grande del mundo con una capacidad de 1.548 MW, el Parque Eólico Shepherd's Flat en Oregon (845 MW) y el Parque Eólico Roscoe en Texas (781,5 MW).

Solo el estado de Texas produce una cuarta parte de la energía eólica de EE. UU. Con 24,9 GW, lo que proporciona más energía eólica que otros 25 estados de EE. UU. juntos.

### **Alemania – capacidad instalada 59,3 GW**

Alemania tiene la capacidad eólica instalada más alta de Europa con 59,3 GW.

Sus parques eólicos marinos más grandes son los Gode Windfarms (fase 1 y 2), que tienen una capacidad combinada de 582 MW. Alemania también alberga el parque eólico marino Nordsee One, que tiene una capacidad de 382 MW y proporciona energía para 400.000 hogares.

Según Wind Europe, Europa instaló 11,7 GW de energía eólica en 2018. De esto, Alemania lideró el camino con un 29% de esta capacidad con un total de poco menos de 3,4 GW, con 2,4 GW de este en tierra y un poco menos de 1 GW en el mar.

### **India – capacidad instalada 35GW**

India tiene la segunda capacidad eólica más alta de Asia y es el único país asiático aparte de China que figura en la lista, con una capacidad total de 35 GW.

El país tiene el tercer y cuarto parque eólico terrestre más grande del mundo, el parque eólico Muppandal en Tamil Nadu, sur de la India (1.500 MW) y el parque eólico Jaisalmer en Rajasthan, norte de la India (1.064 MW).

El gobierno de India ha establecido el objetivo de instalar 60 GW de energía eólica para 2022, con 25 GW para ser instalados en los próximos tres años.

### **España – capacidad instalada 23 GW**

España tiene un fuerte desempeño en energía eólica, con una capacidad de 23 GW que cubre el 18% del suministro eléctrico de España. El país ocupa el quinto lugar en el mundo a pesar de que ninguno de sus parques eólicos en tierra o en alta mar se encuentra entre los 20 principales por capacidad.

La industria eólica española en realidad ha estado en una fuerte caída en los últimos años. Solo se agregaron 104 MW en 2016-2017 después de que no se haya agregado nada en 2015.

Los empleos dentro del sector también han disminuido de alrededor de 41.500 en 2008 a alrededor de 22.500 personas.

### **Reino Unido – capacidad instalada 20,7 GW**

El Reino Unido es el tercer país europeo en la lista, con una capacidad total de poco más de 20,7 GW.

El Reino Unido es particularmente notable en energía eólica marina, con seis de los 10 proyectos eólicos marinos de mayor capacidad en el mundo.

Uno de ellos es el proyecto Walney en la costa de Cumbria, en el noroeste de Inglaterra. Este es el proyecto eólico marino más grande del mundo con Walney 1 y 2 (367 MW) y Walney Extension (659 MW), que forman un total de 1.026 MW.

La instalación de Walney está programada para ser superada por el proyecto Hornsea One de 1.218 MW en el Mar del Norte cuando se complete por completo en 2020.

### **Francia – capacidad instalada 15,3 GW**

Francia ocupa el séptimo lugar en la lista de los 10 principales países de energía eólica por capacidad. Actualmente se está alejando de la energía nuclear, que anteriormente cubría el 75% de las necesidades energéticas del país y llenará el vacío al aumentar su presupuesto renovable a 71.000 millones de euros para el período 2020-2028. Esto le permitirá triplicar su capacidad de energía eólica terrestre para 2030.

Sin embargo, la hostilidad a la energía eólica está «profundamente arraigada» en Francia, ya que gran parte de la población considera que los aerogeneradores son feos y ruidosos.

### **Brasil – capacidad instalada 14,5 GW**

Brasil tiene la capacidad eólica más grande de Sudamérica con 14,5 GW y está expandiendo su capacidad significativamente. Las cifras más recientes muestran que la energía eólica había aumentado un 8,9% interanual en febrero de 2020.

La energía eólica ocupa el cuarto lugar en el mix energético total de Brasil, ya que representa aproximadamente el 8% de la capacidad energética total de Brasil.

## **2.2.4 POTENCIAL EÓLICO EN EL PERÚ**

El potencial eólico probable no aprovechado en la región de la Sierra es de 65152 MW en un área de 4654 km<sup>2</sup>, es decir un aproximado del 2% del área de cada uno de los departamentos de nuestra Sierra.

Los departamentos con áreas a ser aprovechadas para bosques eólicos son: Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad, Ancash, Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna, se estima un promedio del 2% del área de cada departamento que resulta 46542 km<sup>2</sup> aprovechables.

Los diseños de los bosques eólicos consideran turbinas de 7.5 kW, se estima una densidad superficial de potencia 14 MW/kWm<sup>2</sup>, es decir un potencial energético probable de 65152 MW (la capacidad instalada hace ocho años alcanzó los 6 658 MW (dato registrado en la página del ministerio de energía y minas MEM), de los cuales 48% fue de origen hidráulico y 52% térmico, lo que nos indica que si aprovecharíamos solamente el potencial eólico de la costa este sería suficiente y superaría con creces el consumo del país.

### **2.2.5 DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA**

Actualmente la energía eólica dispone de una tecnología madura; en el 2018 la energía del viento produjo 539256 MW (megavatios) en todo el mundo y las proyecciones indicaban que continuaría aumentando, considerando que los países firmantes del protocolo de Kyoto deben cumplir su compromiso y disminuir la emisión de elementos que destruyen la capa de ozono. Ante este panorama, los parques eólicos están ganando cada vez más terreno en el mundo: son generadores de energía y amigos del medio ambiente; en la figura 2 podemos notar la evolución anual de la potencia eléctrica eólica instalada hasta el 2018 y sus cifras.

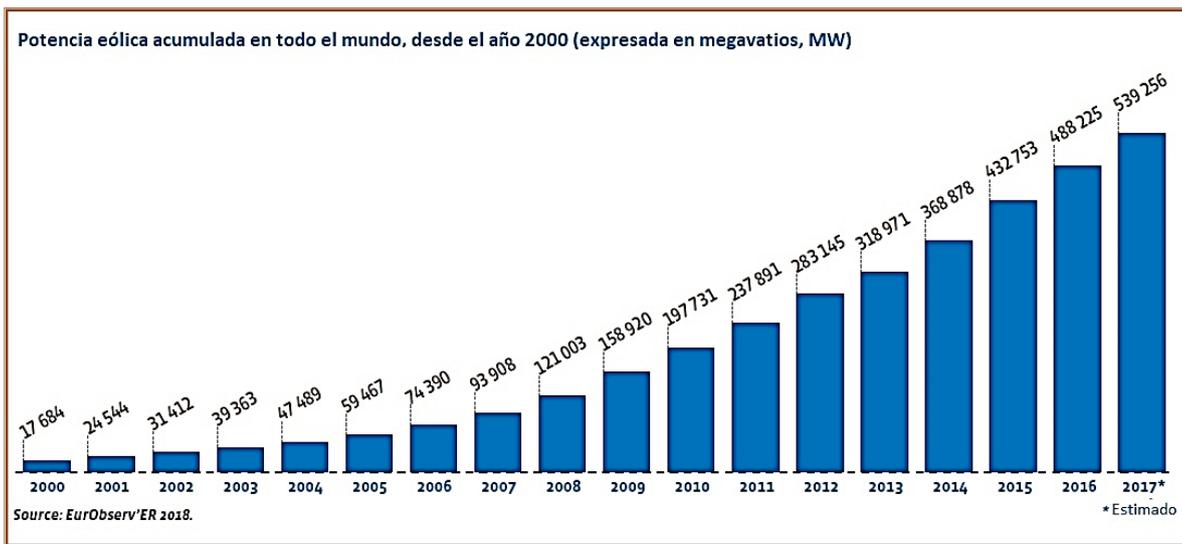


Fig. 02. Evolución instalada a nivel mundial, año 2018, fuente: euroobserver

La figura 03 muestra la potencia instalada en el mundo de energía eléctrica de procedencia eólica hasta el año 2008. Nótese que EEUU fue uno de los primeros países en instalar aerogeneradores (gran parte del desarrollo de la energía eólica ocurrió en la década de los 90) y en el año 2008 fue el país que realizó más instalaciones eólicas. La figura 04 muestra la evolución anual de la potencia eléctrica eólica instalada hasta el 2020 con su respectiva tasa de variación.

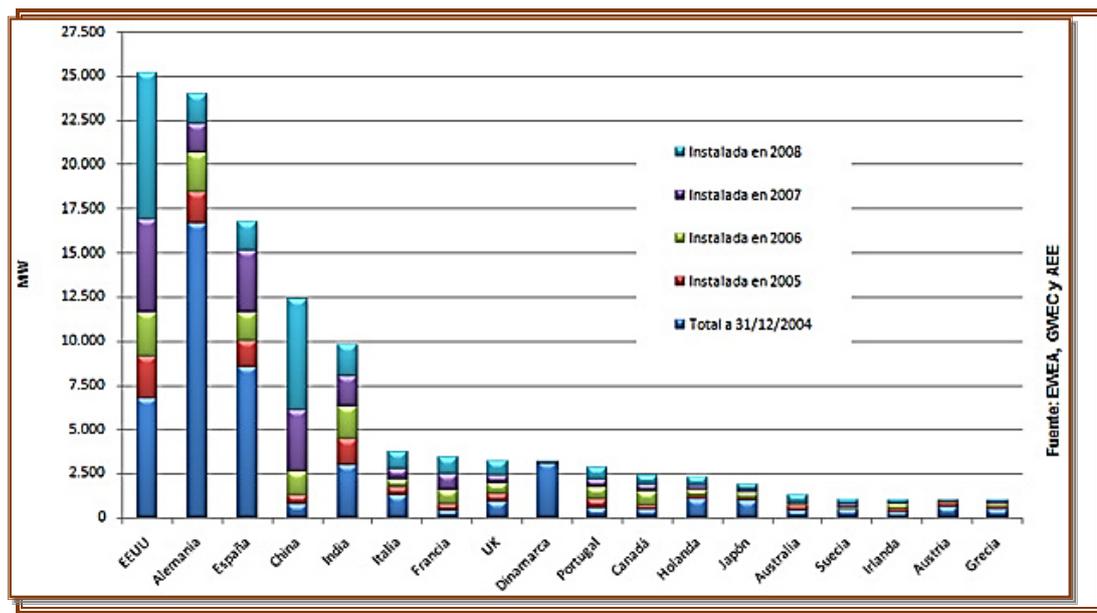


Fig. 03. Potencia instalada en el mundo hasta el año 2008, fuente: www.energias-renovables.com



Fig. 04. Evolución anual de potencia instalada y tasa de variación, fuente: AEE

## 2.2.6 CUOTA DEL MERCADO MUNDIAL DE LOS FABRICANTES DE AEROGENERADORES

“La consultora danesa Make Consulting acaba de hacer público un avance de su informe sobre las cuotas de mercado de los fabricantes de aerogeneradores” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

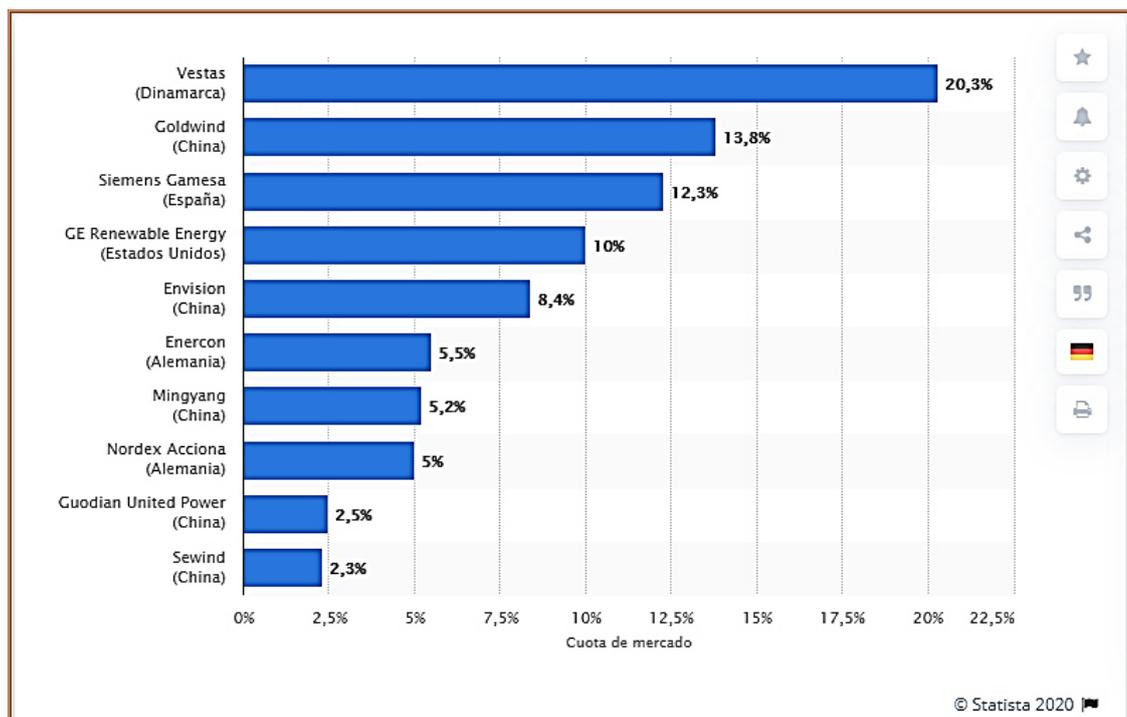


Fig. 05. Fabricantes de Aerogeneradores en el mercado mundial, fuente: Statista

“La clasificación 2020 ha experimentado varios cambios, principalmente a causa del impulso del mercado chino, según el avance de un informe realizado por Make Consulting. La figura indica que la cuota del mercado mundial de la compañía danesa Vestas ocupa el primer puesto; el dato más reseñable del balance 2020 es el meteórico ascenso de China, que logra colocar a dos fabricantes entre los cinco primeros: Goldwind (segundo puesto en el escalafón) y Envision (cuarto). El primero de ellos firmó 3.495 MW instalados en 2020, mientras que Goldwind alcanzó los 2.722 MW.

### 2.2.7 BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA ENERGÍA EÓLICA

“Las fechas más resaltantes de la tecnología eólica y de la utilización de las máquinas eólicas, destacan: En el siglo V antes de cristo, se encuentran las primeras máquinas eólicas en Asia: son máquinas de eje vertical iguales a las denominadas panemonas de algunas islas griegas” (www.energias-renovables.com, 2020).

“En Egipto aproximadamente por la misma época, se utilizaban molinos de eje vertical para moler grano y bombear agua, también en la zona de Sijistán entre Irán y Afganistan. Todos estos molinos tenían el mismo principio, transformar la energía eólica en energía para la molturación del grano, el bombeo de agua entre otras” (www.energias-renovables.com, 2020).



Fig. 06. Molino de eje vertical de cuatro palas (máquina neumática).  
Fuente: Wikipedia 2020

“En el siglo VII después de cristo, se da origen a los primeros modelos rústicos de los clásicos molinos holandeses que hoy en día son mecánicamente sofisticados. Las máquinas eólicas para el bombeo de agua que progresa con la invención de las multipalas en 1870 por los americanos” (www.energias-renovables.com, 2020).



Fig. 07. Los aerogeneradores de la Cour, fuente: WINDPOWER

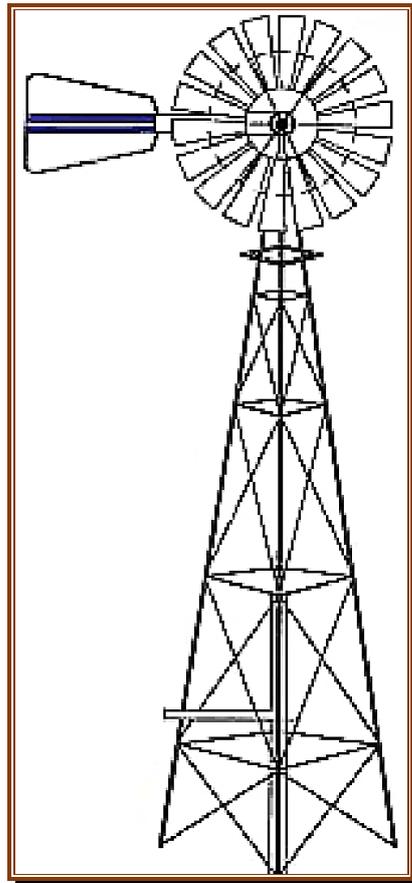


Fig. 08. Multipala tipo americano, fuente: Wikipedia, 2020

“Fue en el año 1802 cuando Lord Kelvin trató de asociar un generador eléctrico a una máquina eólica para la producción de energía. Por la misma época, en 1892, en Dinamarca, país de importantes recursos eólicos, el profesor Latour diseñó el primer aerogenerador eléctrico bajo los auspicios de un programa estatal, marcando el comienzo del desarrollo de la moderna tecnología eólica, ligado a la rotura de la ligadura de las turbinas eólicas con el bombeo de agua y la molienda. Se llegaron a instalar unos 120 aerogeneradores, con una potencia eléctrica máxima unitaria de unos 25 kW, antes de la primera guerra mundial” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“Poul la Cour fue uno de los pioneros de la moderna aerodinámica, y construyó su propio túnel de viento para realizar experimentos, hacia el año 1920 la energía eólica obtiene cierto éxito, pues había trescientos constructores de estos aparatos” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“El estudio en los campos de la aerodinámica permitió alcanzar enormes progresos de las máquinas eólicas, esto hasta el año 1961; desgraciadamente en ese año el precio del petróleo bajó, poniendo al -kilowatt eólico- a precios inaccesibles. Todas las máquinas fueron desmontadas y vendidas a precio de chatarra” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“En 1927 Dekkler construyó el primer rotor provisto de palas de sección aerodinámica (redondeado en su borde de ataque (barlovento) y afilado en su borde de salida (sotavento)), permitiendo velocidades de punta de pala de 4 a 5 veces la velocidad de viento incidente, frente al valor tradicional de 2 a 3 veces. Desde el año 1973 ocurre el proceso inverso, impulsando programas de estudio y realización de aerogeneradores. La demanda en países industrializados es mínima, pero no obstante la demanda en países tercermundistas aumentó de nivel, esto por el obvio bajo costo de producción e instalación de estos aparatos en comparación a las ganancias retribuidas” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

## 2.2.8 CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS EÓLICAS

Según el sitio [energias-renovables.com](http://energias-renovables.com) hay “varios puntos de vista para clasificar las turbinas eólicas, nos dicen que a partir de la década de los veinte, comenzó una serie de desarrollos que confirmaron definitivamente las aeroturbinas de alto rendimiento y alta velocidad como el diseño más efectivo para la producción de energía eléctrica, como consecuencia de la aplicación de la ingeniería aeronáutica. Pero también hicieron aparecer toda una nueva serie de nuevos problemas, como las vibraciones estructurales, las vibraciones de palas acopladas con la corriente de aire (aeroelasticidad), los problemas de corrosión, de duración, etc., sobre los cuales se dispone hoy en día una sólida experiencia”.

Según el sitio web nos dice que sobre esta base se fueron clasificando las distintas familias de aeroturbinas:

1. Aerobombas, “en gran número y generalmente de tipo multipala, con regímenes de giro entre 5 y 15 rpm (revoluciones por minuto). Son capaces de dar un elevado par de arranque óptimo para mover bombas alternativas”. ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

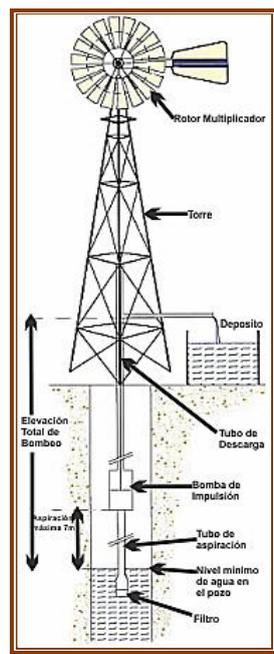


Fig. 09 Molino de bombeo multipala, fuente: Wikipedia 2020

2. Aerogeneradores de muy pequeño tamaño para la recarga de baterías, de menos de 20 kW, “típicamente suministraban unos 5 kW. Resultan apropiados para suministrar balizas electrónicas o radioeléctricas u otras instalaciones remotas, especialmente para potencias muy pequeñas, por la competencia de las células fotovoltaicas y para complementarlas durante la noche. Así también actualmente se utiliza para producción de agua para una vivienda o para una granja, produce entre 75 a 610 litros/24h” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).
3. Aerogeneradores de pequeña potencia (20 kW a 100 kW), media potencia (100 kW a 500 kW) y gran potencia (>500 kW)
  - a. “Para alimentación de una red eléctrica, generalmente agrupadas en pequeños parques eólicos”.
  - b. “Para suplir otro tipo de generadores, como los diéseles en un sistema aislado de la red y por lo tanto autónomo. A su vez puede incluir baterías para almacenar energía sobrante de días ventosos o carecer de ellas”.
  - c. “Para producción de agua, suministra agua a asentamientos humanos y granjas, produce entre 15000 a 33131 litros/24h” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

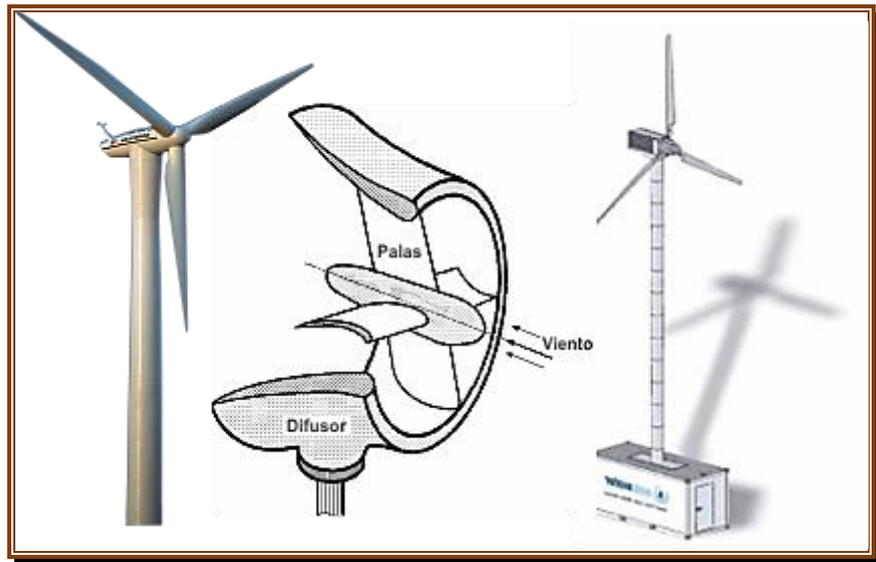


Fig. 10. Modelos de aerogeneradores de medio y gran tamaño energéticos y productor de agua  
Fuente: internet 2020

“En régimen de giro estos aerogeneradores vienen dados por su tamaño, pues típicamente operan con velocidades de punta de pala entre 5 y 10 veces la velocidad del viento. Así las aeroturbinas grandes giran a unas 30 o 40 r.p.m., mientras que las más pequeñas pueden superar las 1000 rpm” (www.energias-renovables.com, 2020).

“**En 1924 Savonius desarrolla una aeroturbina de eje vertical muy sencilla**, con elevado par de arranque, por lo tanto, adecuada para el bombeo de agua consistente en dos semicilindros huecos, decalados y dispuestos según un eje vertical. Se puede construir con técnicas y materiales sencillos y baratos, pero adolece del problema de no poderse proteger de los huracanes” (www.energias-renovables.com, 2020).

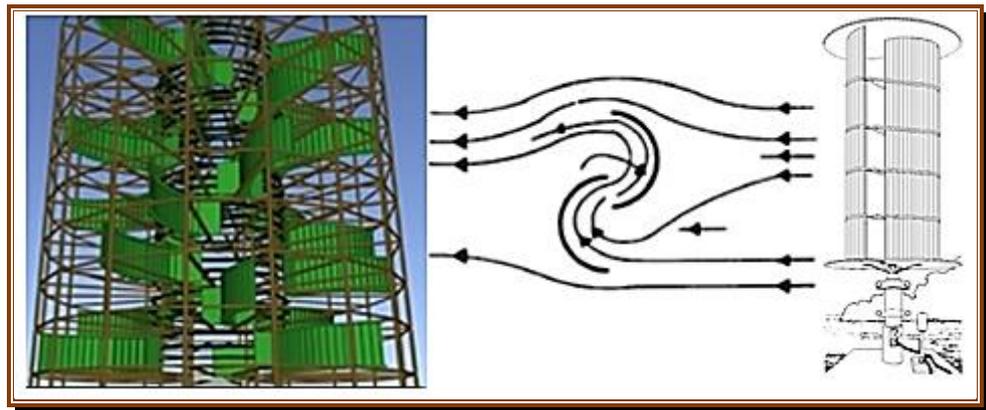


Fig. 11. Modelos de aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius  
Fuente: internet 2020

“En 1924 Darrieus desarrolla la turbina de eje vertical que lleva su nombre, siendo actualmente competitiva. Consiste en aspas verticales con perfil aerodinámico” (www.energias-renovables.com, 2020).



Fig. 12. Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus  
Fuente: internet 2020

“Para mejorar el par de arranque se pueden acoplar otro tipo de rotores haciéndolo mixto (Savonius-Darrieus). Este tipo de aerogeneradores son susceptibles de competir rápidos, bipalas y tripalas de eje horizontal; son objeto de desarrollo y estudio” (www.energias-renovables.com, 2020).

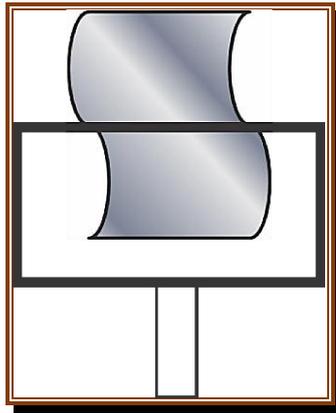


Fig. 13. Aerogenerador Savonius cruzado  
Fuente: internet 2020

### 2.2.9 PARTES DE UN SISTEMA EÓLICO

“Debido a la amplia gama de tamaños disponibles y de aplicaciones a continuación se indicarán las características básicas que definen a los aerogeneradores que actualmente equipan los parques eólicos y a los microaerogeneradores” (www.energias-renovables.com, 2020).

“Los principales subsistemas que podemos encontrar en las máquinas de gran potencia para la generación eólica-eléctrica en grandes parques, se presentan de manera descriptiva en la figura 14” (www.energias-renovables.com, 2020).

#### a) Grandes Aerogeneradores

“Aerogeneradores destinados a la producción de energía eléctrica a gran escala, cuya potencia nominal es de cientos de kilowatios (en la actualidad las máquinas instaladas en su mayoría tienen potencias nominales de 600 y 900 kW)” (www.energias-renovables.com, 2020).

El aerogenerador por 3 partes:

**Torre:** “Estructura que soporta el aerogenerador (góndola y el rotor), mejor cuanto más alta es, a mayor altura mayor velocidad de viento, un aerogenerador de 600 kW puede estar en torno a los 50 metros. Las torres pueden ser

tubulares (más seguras) o, de celosía (más baratas)” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

**Turbina Eólica:** “Se encarga de captar energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica en su eje” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

Los componentes de la turbina eólica son:

**Buje:** “O cubo; centro del rotor donde se encastran las palas y mediante el cual la potencia captada por el rotor se transmite al eje principal. En función de si el rotor está formado por dos o tres palas pueden presentarse dos tipos de buje: **Rígido**, para aerogeneradores de tres palas, que consiste en una estructura metálica hueca que típicamente se construye con base en una fundición de acero nodular y **Basculante**, para aerogeneradores de dos palas, el cual permite que las palas se puedan mover, ligeramente, en una dirección perpendicular al plano del rotor” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

**Carenado (Nariz):** “El carenado del rotor es una cubierta frontal en forma de cono que sirve para desviar el viento hacia el tren motor y mejorar la ventilación en el interior, eliminar turbulencia indeseable en el centro frontal del rotor y mejorar el aspecto estético” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

**Pala:** “Transforma por aprovechamiento aerodinámico la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje del generador” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

**Góndola:** “Ubicada en la parte superior del aerogenerador, dentro se encuentran el multiplicador, el generador eléctrico o el sistema de orientación, los 2 primeros son componentes claves del aerogenerador. Las

palas, el rotor del aerogenerador y el buje están situados a la izquierda de la góndola” (www.energias-renovables.com, 2020).

Los componentes de la góndola son:

- **Anemómetro:** “Mide la velocidad del viento, envía señales al controlador electrónico conectando el aerogenerador cuando el viento alcance la velocidad de arranque, Si la velocidad es superior a la de corte, el ordenador parará el aerogenerador para evitar los desperfectos” (www.energias-renovables.com, 2020).
- **Controlador electrónico:** “Equipado con un ordenador para monitorear las condiciones del aerogenerador y controlar el mecanismo de orientación, en caso de disfunción automáticamente detiene el aerogenerador y da aviso al ordenador del operario encargado de la turbina” (www.energias-renovables.com, 2020).
- **Eje de alta velocidad con su freno mecánico:** “Gira aproximadamente a 1,500 revoluciones por minuto (r.p.m.) lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina” (www.energias-renovables.com, 2020).
- **Generador eléctrico:** “Transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Existen fundamentalmente 3 tipos de generadores: Generador asíncrono de jaula de ardilla, Generador asíncrono de rotor bobinado y Generador síncrono de imanes permanentes” (www.energias-renovables.com, 2020).
- **Freno de disco:** “Se aplica después que la velocidad de rotación del rotor se reduce considerablemente, y por consecuencia, el par motriz es mucho

menor. Es utilizado para efectuar el paro forzado (medio principal de frenado)” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

- **Multiplicador:** “Sistema mecánico encargada de elevar la velocidad de giro del sistema mediante un conjunto de engranajes comunica al eje arrastrado o de salida una velocidad de giro mayor que la del eje motor o, de entrada, desde la velocidad de la turbina (20-30 rpm) a la velocidad del generador (1000-1500 rpm)” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).
- **Mecanismo de Orientación:** “Utilizado para mantener el rotor de la turbina en posición contra el viento (perpendicular a la dirección del viento) para que a través del rotor pase la mayor proporción posible de energía eólica” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).
- **Sistema Hidráulico:** “Restaura los frenos aerodinámicos del aerogenerador” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).
- **Unidad de Refrigeración:** “Compuesta por un ventilador eléctrico y una unidad de refrigeración de aceite, el primero enfría el generador eléctrico y el segundo enfría el aceite del multiplicador, otras turbinas tienen generadores enfriados por agua” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).
- **Veleta:** “Mide la dirección del viento, envía señales al controlador electrónico de forma que hace girar el aerogenerador en contra del viento utilizando el mecanismo de orientación” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

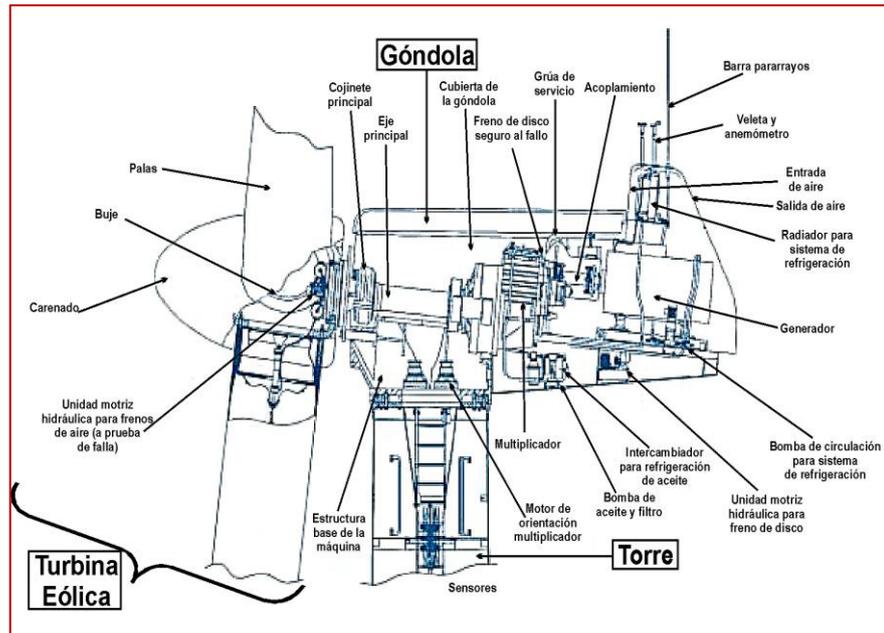


Fig. 14. Componentes de una aeroturbina, fuente: internet 2020

## b) Pequeños Aerogeneradores

“Este tipo de generadores suelen ser instalados en zonas alejadas del suministro eléctrico o trazado de la red general de distribución eléctrica, el tamaño y tipo de instalación depende únicamente de las necesidades del usuario de la instalación y es característico en ellos que la instalación se sitúe muy cerca del centro de consumo (viviendas, granjas o pequeños núcleos rurales), requiriéndose frecuentemente la existencia de acumuladores” (www.energias-renovables.com, 2020).

“Las instalaciones más frecuentes emplean tecnologías muy fiables en las que es necesario un mantenimiento básico, las aeroturbinas empleadas en las instalaciones de pequeña potencia son aerogeneradores de alta velocidad ( $\lambda > 2$ ), normalmente utilizadas para suministro eléctrico a viviendas aisladas y/o otros centros de consumo, la potencia de estas aeroturbinas varía entre 100 W y 10 kW” (www.energias-renovables.com, 2020).

Estos aerogeneradores son muchos más simples que los descritos anteriormente para sistemas de generación a gran escala, sus características fundamentales son:

### 1. **Aerogenerador de viento de baja potencia:**

**Turbina:** Puede tener 2 o 3 palas realizadas en fibra de vidrio y carbono.

**Generador:** “Es de imanes permanentes y está acoplado directamente a la turbina (no utiliza multiplicador)” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

**Sistema de Orientación:** “Ejerce el papel de sistema primario de protección ante velocidades elevadas de viento, consiste en una cola, tal como se ve en la figura (abajo). Los sistemas de orientación automática están diseñados especialmente para conseguir una sensible timonización ante rachas de viento de bajas velocidades, cuando las velocidades se acercan a valores demasiado elevados para el buen funcionamiento de la máquina, este sistema produce la progresiva desorientación del aerogenerador que lo lleva a dejar de funcionar” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

**Salida del sistema:** Depende del sistema al que se desee abastecer puede ser en corriente continua o alterna.

**Torre:** Puede ser de celosía o tubular.

### 2. **Equipo de regulación y monitorización del aerogenerador (Segundo sistema de seguridad):**

“Conjunto de resistencias de frenado y un regulador de carga, que desvía hacia el conjunto de resistencias los excedentes de energía que las baterías de la instalación no pueden asumir, evitándose de este modo que el aerogenerador tenga que estar funcionando en vacío y por lo tanto girando a velocidades peligrosamente elevadas, en los periodos de tiempo en que las baterías presentan elevados niveles de carga” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

3. **Banco de Baterías:** “Almacena energía durante varios días, con el objeto de disponer de energía en los períodos de viento flojo o de calma, este sistema es inútil en sistemas de generación eléctrica conectados a la red” (www.energias-renovables.com, 2020).
4. **Inversor:** “Transforma y amplifica corriente continua en alterna. Los voltajes continuos pueden ir desde los 12 V hasta los 100 V” (www.energias-renovables.com, 2020).
5. **Punto de Consumo:** Lugares alejados o remotos y centros poblados que no están interconectados a la red eléctrica nacional.

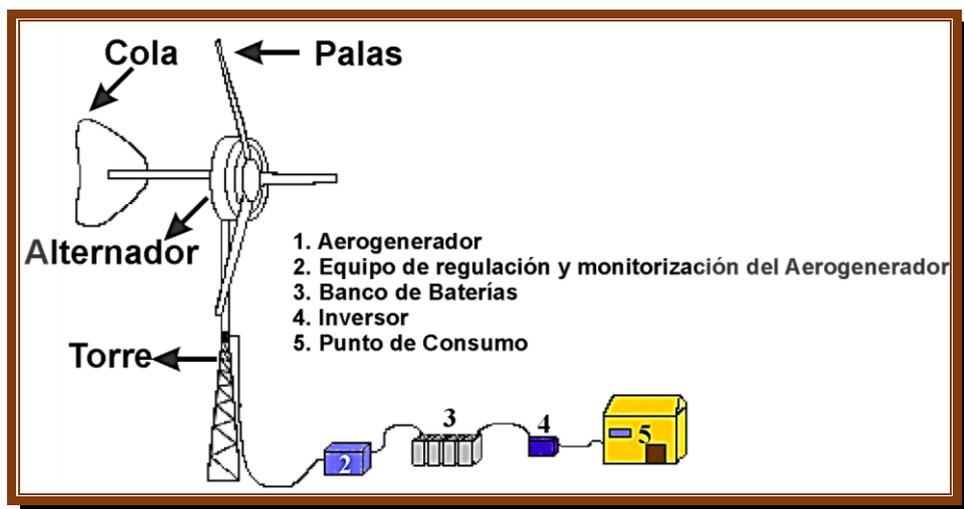


Fig. 15. Pequeños Aerogeneradores y sus partes.  
Fuente: internet 2020

### 2.2.10 CURVA DE POTENCIA

“Define la potencia eléctrica disponible como función de la velocidad del viento. Es nula hasta una velocidad mínima o de arranque  $v_a$  y a partir de ella crece rápidamente (aproximadamente como el cubo de la velocidad) creciendo asimismo el régimen de giro del rotor. Al llegar el viento a una velocidad,  $v_n$ , en torno a los 10 a 15 m/s comienzan a actuar los mecanismos de limitación y la potencia de salida

y régimen del rotor se mantienen aproximadamente constantes” (www.energias-renovables.com, 2020).

“Esta potencia se denomina potencia nominal  $P_n$ , y se mantiene hasta los 20 a 25 m/s. A partir de aquí,  $v_{pa}$ , la potencia de salida cae rápidamente o se anula el funcionamiento, pues comienzan a actuar los mecanismos de protección, frenando el rotor para evitar riesgos. La velocidad de viento de supervivencia puede ser en torno a los 50 a 60 m/s” (www.energias-renovables.com, 2020).

La figura 16 muestra las curvas de potencia de una misma turbina de eje horizontal dotada de regulación por cambio de paso y por pérdida aerodinámica.

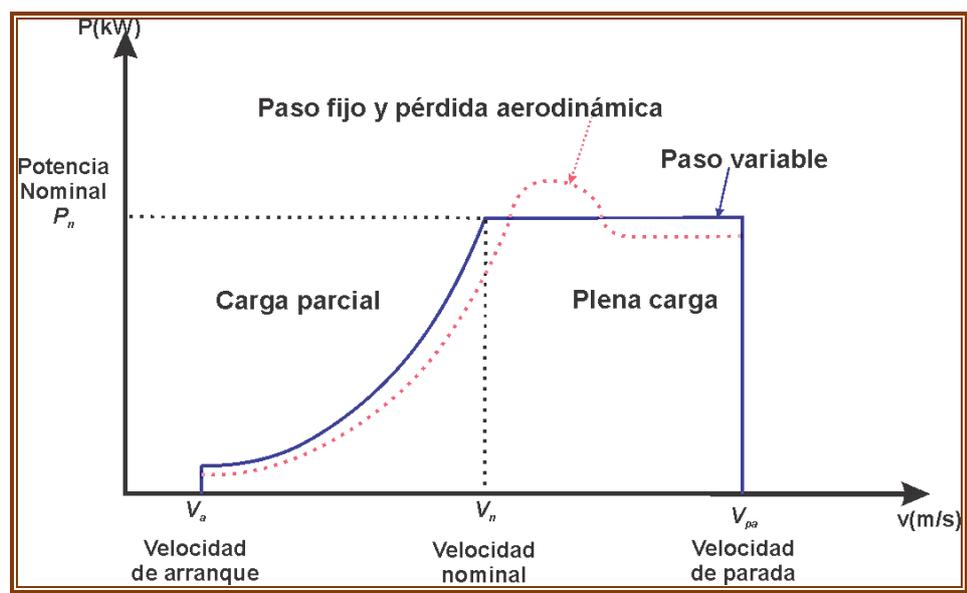


Fig. 16. Curvas de potencia de una misma turbina, con regulación por cambio de paso y con regulación por pérdida aerodinámica, fuente: internet 2020

## 2.2.11 LA ENERGÍA EN EL VIENTO: DENSIDAD DEL AIRE Y ÁREA DE BARRIDO DEL ROTOR

“Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área del barrido del rotor y de la velocidad del viento” (www.energias-renovables.com, 2020).

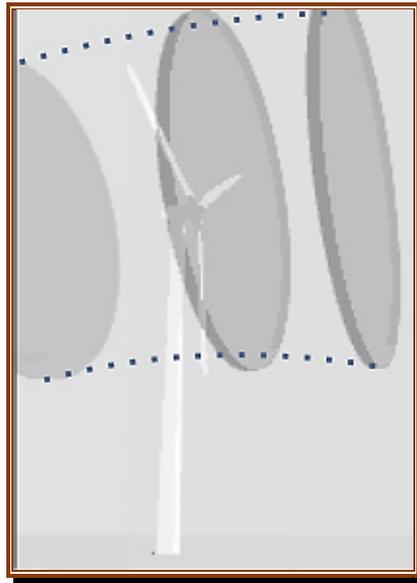


Fig. 17 Área del barrido del rotor  
Fuente: internet 2020

### 2.2.12 DENSIDAD DEL AIRE

“La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen” (www.energias-renovables.com, 2020).

“En otras palabras, cuanto “más pesado” sea el aire más energía recibirá la turbina. A presión atmosférica normal y a 15 °C el aire pesa unos 1.225 kilogramos por metro cúbico, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad. Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es baja y el aire es menos denso” (www.energias-renovables.com, 2020).

### 2.2.13 ÁREA DE BARRIDO DEL ROTOR

“Un aerogenerador típico de 1 MW tiene un diámetro de rotor de 54 metros, lo que supone un área un área del rotor de unos 2.300 metros cuadrados. El área del rotor determina cuanta energía del viento es capaz de capturar una turbina eólica. Dado que el área del rotor aumenta con el cuadrado del diámetro del rotor, una turbina

que sea dos veces más grande recibirá  $2^2 = 2 \times 2 =$  cuatro veces más energía” (www.energias-renovables.com, 2020).

#### 2.2.14 CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO

La potencia aprovechable por una maquina eólica de área A, frente a un flujo de aire a una velocidad v y la densidad  $\rho$  es:

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

Donde:

A= área del motor eólico

V= velocidad del viento en (m/s)

$\rho$ = densidad del aire (1.2 kg/m<sup>3</sup>)

P= potencia cinética del viento en (m/s)

$C_p$ = es el coeficiente de potencia y mide la fracción de energía extraída del rotor y es función de la velocidad del viento, este valor tiene un límite teórico conocido como el límite de Betz, y que es igual a 0.59.

La ecuación nos muestra la relación de la potencia con la velocidad. Además, nos indica la ventaja de operar a nivel del mar, donde la densidad es muy alta, con un valor medio de 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Permittiéndonos obtener la potencia eólica de una corriente uniforme, en principio enteramente disponible para su transformación en otra forma de energía mecánica, por metro cuadrado de sección y a nivel del mar y para varias velocidades del viento. Los resultados a continuación:

**Tabla 01: Relacion entre la velocidad del viento, su valor en grados beaufort, sus efectos altamente apreciables, la densidad de potencia, la energia alo largo de una año y la presion dinamica  $\rho V^2/2$**

Velocidad (m/s)	1	2	5	7	10	20	40
Fuerza del viento (grados Beaufort)	1	2	3	4	5	9	12
Definición por observación de sus efectos	No mueve banderas	Mueve banderas	Extiende banderas	Levanta polvo. Mueve las ramas pequeñas de árboles	Mueve los árboles pequeños. En estanques forma pequeñas olas	Desperfectos en partes salientes de edificios. Derribo de chimeneas	No hay experiencia
Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )	0.6	4.9	76	210	612	4.9·10 <sup>3</sup>	39·10 <sup>3</sup>
Energía anual kWh	5.3	43	666	1.84·10 <sup>3</sup>	5.36·10 <sup>3</sup>	42.9·10 <sup>3</sup>	341·10 <sup>3</sup>
Presión dinámica (mbar)	6.1·10 <sup>-3</sup>	0.025	0.15	0.30	0.61	2.45	9.8

Fuente: LA ENERGÍA EÓLICA: Principios básicos y tecnología

Puede deducirse de los valores obtenidos que por encima de 5 m/s la densidad de potencia del viento es interesante.

### 2.2.15 PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DEL POTENCIAL EÓLICO

Para realizar un análisis exhaustivo de los datos de viento es necesario conocer:

- A. Las condiciones generales de viento en un emplazamiento:
  - (a) Condiciones meteorológicas (Temperatura, presión, humedad relativa, densidad del aire).
  - (b) Distribución de frecuencias de dirección.
  - (c) Distribución de frecuencias de velocidad.
  - (d) Variación temporal de la velocidad.
  - (e) Potencial eólico disponible.
- B. Las características del viento para el funcionamiento del sistema:
  - (a) Perfil vertical de velocidad horizontal.
  - (b) Variación de la velocidad vertical.

- (c) Relaciones entre viento vertical y horizontal.
- (d) Factores de ráfaga.
- (e) Características de turbulencia
- (f) Desviación de la dirección.

“El potencial de generación eléctrica eólica disponible se puede determinar conociendo la distribución de probabilidades de velocidades de viento. El conocimiento de una expresión analítica es extremadamente útil cuando no se dispone de la serie temporal o es necesario extrapolar datos de un lugar a otro, o de una altura a otra” (www.energias-renovables.com, 2020).

Según Weibull, la curva de frecuencias de la velocidad de viento puede ajustarse mediante una función del tipo:

$$f(v) = aCv^{c-1} e^{-av^c} \quad v>0, a>0, C>0,$$

Donde:

C: es el parámetro de forma.

$a^{-1/c}$ : es el factor de escala

Esta función tiene las siguientes características:

- para  $C>1$ , la función tiene un máximo lejos del origen.
- Para  $C<1$ , es la monótona decreciente.
- Para  $C=$ , la función es exponencial.
- Para  $C=2$ , es la función de Rayleigh y para el caso de  $C=3.5$  es una distribución normal. El valor más usual es  $C= 2 \pm 0.5$

La distribución de frecuencias acumuladas de Weibull  $F(v)$  que da la probabilidad de una velocidad del viento igual o menor que  $v$  se obtiene integrando la función de distribución  $f(v)$  resultando:

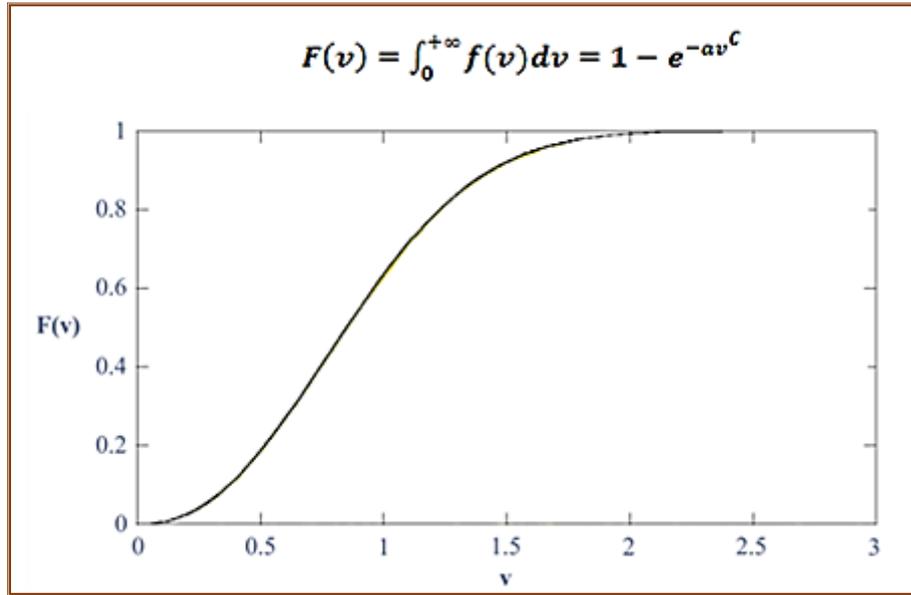


Fig. 18 F(v) de weibull a=1; C=2.3, fuente: internet 2020

Los parámetros estadísticos de la función de Weibull en función de a y C son:

$$\sigma^2 = a^{\frac{2}{c}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right) \right]$$

$$\overline{v^2} = a^{\frac{2}{c}} \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)$$

$$\text{Mediana} = a^{\frac{1}{c}} \ln(2)^{\frac{1}{c}}$$

$$\text{Moda} = a^{-\frac{1}{c}} \left(\frac{c-1}{c}\right)^{\frac{1}{c}}$$

La velocidad media  $\bar{v}$  y el FPE en función de a y C son:

$$FPE = \frac{\overline{v^3}}{\bar{v}^3} = \frac{\Gamma(1+\frac{3}{c})}{\Gamma^3(1+\frac{1}{c})}$$

$$\bar{v} = a^{\frac{1}{c}} \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)$$

La energía media disponible es:

$$\overline{P_d} = \frac{1}{2} \rho \overline{v^3} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{3}{c}} \Gamma\left(1 + \frac{3}{c}\right)$$

donde  $\Gamma$  es la función gamma que se define como:

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} s^{x-1} e^{-s} ds$$

y cumple que:

$$(x + 1) \Gamma(x) = x \Gamma(x) \quad x \in \mathbf{R}$$

$$\Gamma(n) = (n - 1)! \quad x \in \mathbf{Z} +$$

La velocidad del viento varia con la distancia al suelo, debido a la capa límite terrestre, siendo afectada por los obstáculos aguas arriba del punto considerado y del perfil del terreno en las inmediaciones. Comúnmente las mediciones de viento por lo general no se realizan a la altura a la que se va a instalar la aeroturbina, aunque ello es aconsejable. Con el objeto de corregir los datos se suele usar una ley de variación con la altura como la siguiente:

$$V = V_0 (h/h_0)^n$$

Donde:

$V$  = velocidad del viento a la altura  $h$  sobre el punto de velocidad nula (altura de árboles de edificios, de hierba, etc.)

$V_0$  = Velocidad del viento en el punto de medida, típicamente 30 metros por encima del punto de velocidad nula.

Para las características de rugosidad del terreno se debe considerar la velocidad del viento en metros por segundo a 10 metros de altura de la siguiente forma para valores orientativos de  $n$ :

**Tabla 02: Rangos de rugosidades en el suelo**

Rangos de Rugosidad	
1	Plana (playa, hielo, paisaje de nieve, océano)
2	Abierta (pasto corto, aeropuertos, tierra de cultivo vacía)
3	Aspera (cultivos altos en hilera, árboles bajos)
4	Muy áspera (bosques y huertos)
5	Cerrada (pueblos, suburbios)
6	Ciudad (centros de ciudades, espacios abiertos en los bosques)

Rangos de velocidades del viento en m/s para diferentes rugosidades de terreno						
Índice	Rangos de rugosidad de la superficie					
	1	2	3	4	5	6
1	0.0 – 1.5	0.0 – 1.3	0.0 – 1.2	0.0 – 1.1	0.0 – 1.0	0.0 – 0.9
2	1.5 – 2.5	1.3 – 2.2	1.2 – 2.1	1.1 – 1.9	1.0 – 1.6	0.9 – 1.5
3	2.5 – 3.5	2.3 – 3.1	2.1 – 2.9	1.9 – 2.6	1.6 – 2.3	1.5 – 2.1
4	3.5 – 4.5	3.1 – 4.0	2.9 – 3.7	2.6 – 3.3	2.3 – 2.9	2.1 – 2.7
5	4.5 – 6.5	4.0 – 4.9	3.7 – 4.6	3.3 – 4.1	2.9 – 3.6	2.7 – 3.3
6	5.5 – 6.5	4.9 – 5.7	4.6 – 5.4	4.1 – 4.8	3.6 – 4.2	3.3 – 3.9
7	6.5 – 7.5	5.7 – 6.6	5.4 – 6.2	4.8 – 5.6	4.2 – 4.9	3.9 – 4.5
8	7.5 – 8.5	6.6 – 7.5	6.2 – 7.1	5.6 – 6.3	4.9 – 5.5	4.5 – 5.1
9	8.5 – 9.5	7.5 – 7.7	7.1 – 8.2	6.3 – 7.3	5.5 – 6.4	5.1 – 5.8
10	9.5 – 10.5	7.7 – 9.3	8.2 – 8.7	7.3 – 7.8	6.4 – 6.8	5.8 – 6.2
11	10.5 – 11.5	9.3 – 10.2	8.7 – 9.6	7.8 – 8.5	6.8 – 7.5	6.2 – 6.8
12	11.5 – 12.5	10.2 – 11.0	9.6 – 10.4	8.5 – 9.3	7.5 – 8.1	6.8 – 7.4
13	12.5 – 13.5	11.0 – 11.9	10.4 – 11.2	9.3 – 10.0	8.1 – 8.8	7.4 – 8.0
14	13.5 – 14.5	11.9 – 12.8	11.2 – 12.1	10.0 – 10.8	8.8 – 9.4	8.0 – 8.6

## 2.2.16 VARIACIONES TEMPORALES DEL VIENTO

“Además de los parámetros que describen la distribución de velocidades de viento, deben tenerse en cuenta las fluctuaciones de la velocidad del viento. Los movimientos de la atmósfera varían en un amplio rango de escalas temporales (entre segundos y meses) y espaciales (en centímetros a miles de kilómetros). Mediante un análisis de series temporales de datos de viento en la región cercana al suelo, se observa que existen determinados ciclos o fluctuaciones de la velocidad de viento en diversos rangos de frecuencias. Estos ciclos están relacionados a las diferentes escalas del movimiento atmosférico, los cuales no sólo tienen relación con la radiación solar, sino también por las energías procedentes de los diversos

intercambios dinámicos, térmicos y radiativos que tienen lugar de manera simultánea en la atmósfera” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“Una buena manera de separar las fluctuaciones a corto y largo plazo en la velocidad del viento es tener en cuenta el tiempo al que se refieren los análisis y características del viento. En relación con la distribución la zona de muy bajas frecuencias del espectro representa la energía asociada a los ciclos anuales motivados por el movimiento de la Tierra en su órbita alrededor del sol; a continuación, la zona de bajas frecuencias intermedias constituye el rango meteorológico de macroescala y las variaciones se deben a los movimientos sinópticos a gran escala de las masas de aire que ocurre normalmente debido a pasos de frentes ciclónicos y anticiclónicos con períodos de duración entre tres y cuatro días. En la zona de alta frecuencia del espectro las variaciones son debidas a las turbulencias, y forma parte el rango meteorológico de microescala como consecuencia del intercambio mecánico en las capas bajas de la atmósfera debido a las características superficiales del terreno, y los ciclos de energía están centrados alrededor del intervalo de un minuto” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“Es importante tener en cuenta la ausencia de energía asociada en el intervalo entre diez minutos y dos horas. Una consecuencia práctica es que se puede considerar un tiempo de promedio en este intervalo sin perder información característica de los ciclos típicos de energía. La variación espectral de la energía cinética del viento representa cuantitativamente y cualitativamente la distribución de las frecuencias de variación del viento” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

## 2.2.17 CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS VARIACIONES TEMPORALES DEL VIENTO

“El movimiento atmosférico está caracterizado por escalas temporales y espaciales que cubren un rango muy amplio, en virtud del elevado valor del número de Reynolds que lo caracteriza. Así, podemos encontrar que la velocidad del viento puede variar del orden de sí misma en escalas de centímetros, debido a la turbulencia de pequeña escala (microescala). Puede cambiar del orden de sí misma en escalas del orden de metros, también por la turbulencia y por el gradiente vertical de velocidad media debido a la capa límite. Finalmente, puede variar del orden de sí misma en escalas mayores, debido al efecto de la orografía y de las estructuras climatológicas. Las aeroturbinas, con tamaños característicos de metros o decenas de ellos, detectan estas variaciones locales durante su giro, lo cual carga su estructura con fuerzas variables, generando fatiga e irregularidades en la electricidad” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“Lo mismo ocurre con las variaciones temporales, pues el viento medido a punto fijo muestra una variabilidad de corto período, digamos que, desde segundos a minutos debido a la turbulencia, por lo que afectan la marcha de la aeroturbina. Las escalas temporales mayores, muestran un comportamiento coherente, al contrario que las espaciales, pues no se detectan variaciones importantes en el rango de 2 a 10 horas. Esto permite elegir este período para obtener estadísticas fiables. En contraste, se detectan variaciones importantes en escalas de  $\frac{1}{2}$  día y 1 día. Las escalas mayores se deben al tiempo de residencia de fenómenos meteorológicos, típicamente varios días, al período anual y variaciones más largas. Estas escalas temporales determinan la capacidad energética disponible y han de ser tenidas en cuenta” ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2020).

“La estructura del viento puede por lo tanto considerarse como la superposición de variaciones turbulentas, aleatorias, y variaciones cuasiperiódicas. Para la correcta evaluación del potencial eólico conviene, por tanto, usar períodos de medida T iguales al período más próximo (½ día, 1 día, 1 año) o múltiplos enteros de ellos. Para la correcta evaluación de la turbulencia se ha de elegir un período de duración muy superior a la escala mayor turbulenta (minutos), pero menor que el tiempo en que el viento cambia de comportamiento, por el motivo macroscópico que sea” (www.energias-renovables.com, 2020).

Para evaluar la turbulencia se usa generalmente un filtro pasabajos (de media móvil) para obtener la velocidad media  $\bar{v}$  y así poderla restar de la medida instantánea, con el objeto de obtener una desviación estándar  $\sigma_v$ . Con ella se define la intensidad de la turbulencia  $I_v$ :

$$I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}; \quad \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (v - \bar{v})^2 dt$$

“La intensidad de la turbulencia, medida con anemómetros, se usa para estimar las cargas sobre la aeroturbina. Si los períodos de medida T son largos y eventualmente se ha eliminado el efecto de la turbulencia de las medidas, lo que se obtiene de la expresión anterior es una medida de la variabilidad del viento, por lo que denomina índice de variabilidad IV” (www.energias-renovables.com, 2020).

Es necesaria una elaboración adicional para obtener la equivalencia energética del viento, dado que la potencia depende no linealmente de la velocidad. El procedimiento correcto es evaluar una velocidad cúbica media equivalente:

$$\overline{v^3} = \frac{1}{T\rho} \int_{-T/2}^{T/2} \rho v^3 dt; \quad \bar{\rho} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \rho dt$$

Que permitiría obtener la potencia media del viento durante este periodo:

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

Se podría haber usado una densidad de referencia, como la densidad del nivel del mar, en lugar de la densidad media. Si se conoce la curva de potencia de la aeroturbina puede deducirse de ella su coeficiente de potencia como función de la velocidad del viento  $C_p(v)$ , bastando para ello dividir por  $1/2\rho v^3$

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

Y calcularse la potencia aprovechada media bajo hipótesis de cuasiestacionariedad:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} A \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \rho v^3 C_p(v) dt$$

Donde A es la sección frontal de la aeroturbina.

La obtención de estas integrales con precisión requiere disponer de registros de velocidad y densidad instantáneas fiables y muy largos, los cuales raramente están disponibles y ocupan mucho espacio. Resulta más cómodo reducir los datos de medidas de velocidad in situ, o posteriormente, y obtener un histograma de la probabilidad de obtener velocidades dentro de  $N$  intervalos de ella discretos, para el intervalo  $T$ ,  $p(v)$ . La potencia media viene dada por:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} A \sum_{i=0}^{i=N} \rho v^3 p(v) C_p(v)$$

Una ventaja adicional de este método es que la distribución de densidad de probabilidad de la velocidad del viento  $f(v)$  generalmente se puede aproximar razonablemente bien por una función de Weibull (la cual encontramos en otras disciplinas para describir fenómenos muy diferentes, como la distribución del tamaño de partículas en un aerosol (Rössin - Rambler) o la velocidad de liberación

de calor en una combustión en el interior de un motor alternativo (Wiebe)). Tiene la forma:

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

en donde:

$c$  = factor de escala, con valor próximo a la velocidad media.

$k$  = factor adimensional de forma, típicamente próximo a 2.

La figura 21 muestra la forma de esta función. Propiedades:

$$p(v \geq v_x) = \exp\left[-\left(\frac{v_x}{c}\right)^k\right]; \quad p(v_y \geq v \geq v_x) = \exp\left[-\left(\frac{v_x}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_y}{c}\right)^k\right]$$

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right); \quad \sigma^2 = c^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]; \quad \overline{v^3} = c^3\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

A la curva  $p(v \geq v_x) = \exp[-(v_x/c)^k]$ , que nos da la probabilidad de tener viento con velocidad mayor que  $v_x$ , o sea, la distribución acumulada de probabilidad de velocidades, se la conoce como curva de duración de viento. Lógicamente tiene una abscisa de valor 1 para velocidad nula y es monótonamente decreciente, como puede observarse en la figura 21. Esta curva, sin embargo, se suele representar la probabilidad multiplicada por el número de horas total durante la medida, o sea,  $T$ . Nos da así las horas en que la velocidad es superior al valor leído.

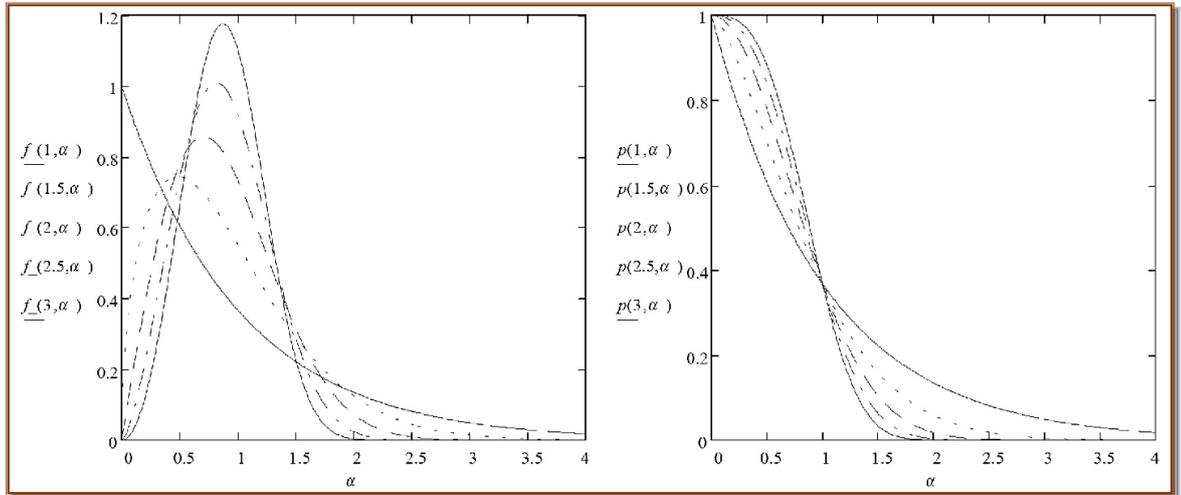


Fig. 19. Forma de la función de densidad de probabilidad de Weibull  $f(k,a)$  y su integral  $p(k,a)$ ,  $a = v/c$ .  
Fuente: La energía eólica: Principios básicos y tecnología

El factor de potencia eólica  $FPE$  se define para corregir el cubo del valor de velocidad media, el cual en ocasiones es el único dato disponible y obtener la velocidad cúbica media, a usar para obtener la potencia media. Su expresión y la del índice de variabilidad  $IV$  vienen dados por:

$$FPE = \frac{\bar{v}^3}{\bar{v}^3} = \frac{\Gamma(1+\frac{3}{k})}{\Gamma^3(1+\frac{1}{k})}; \quad IV = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} = \left[ \frac{\Gamma(1+\frac{2}{k})}{\Gamma^2(1+\frac{1}{k})} - 1 \right]^{1/2}$$

$\Gamma$  es la función gamma. Los valores de  $c$  y  $k$  son determinados por ajuste de los datos obtenidos en las campañas de medidas a la distribución de Weibull, usualmente por mínimos cuadrados. La figura 21 muestra un resultado de realizar este ajuste.

Dado que es necesario recurrir a datos del pasado a menudo se dispone tan solo de medidas de la velocidad media y de una indicación de la variabilidad del viento. En estos casos se puede obtener una estimación grosera de los parámetros como sigue:

$$k = \begin{cases} 1,05\bar{v}^{1/2} & \text{para baja variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,1) \\ 0,94\bar{v}^{1/2} & \text{para media variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,5); \\ 0,83\bar{v}^{1/2} & \text{para alta variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,9) \end{cases} \quad c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)}; \quad v \text{ en m/s}$$

Si se dispone además de datos de la desviación estándar,  $\sigma$  se pueden determinar los parámetros  $c$  y  $k$  resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right); \quad \sigma^2 = c^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$$

Con el uso de una distribución de densidad de probabilidad se puede usar:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}A \int_0^{\infty} \rho v^3 f(v) C_p(v) dv$$

La energía  $E$  obtenida en un cierto periodo  $T$ , caso de estacionariedad en los valores medios, viene dada por  $E = PT$ , o bien es necesario integrar la curva:

$$E = \int_0^T \bar{P}(t) dt.$$

El método de obtención de la energía producida recién descrito se denomina método estático y adolece de los inconvenientes de no tener en cuenta efectos no estacionarios, como la aceleración y deceleración de la turbina frente a viento racheado, ignora pérdida por orientación de la turbina al viento, períodos de mantenimiento, etc. "A cambio, resulta sencillo y puede utilizarse para estudios de viabilidad, así como de sensibilidad frente a parámetros operativos o de diseño.

Un procedimiento más informativo y que puede resultar más aproximado es el método semiestático. Consiste en pasar la serie temporal de velocidades del viento por la curva de potencia de la aeroturbina y obtener con ello una serie temporal de potencias generadas. Esta serie informa sobre los arranques y paradas necesarios, así como los cambios de orientación necesarios caso de disponerse de información sobre la dirección del viento. Al igual que el procedimiento estático adolece del

inconveniente de basarse en una curva de potencia estática” (www.energias-renovables.com, 2020)..

“El método cuasidinámico usa la serie temporal de datos del viento como entrada a un modelo numérico del funcionamiento de la turbina, incluyendo sus sistemas de control. Así se obtienen datos más fiables de la energía producida, del comportamiento del sistema de orientación, del número de arranques y paradas, así como investigar la influencia de distintas estrategias de control” (www.energias-renovables.com, 2020).

La figura 23 muestra un esquema sinóptico de los métodos de evaluación energética.

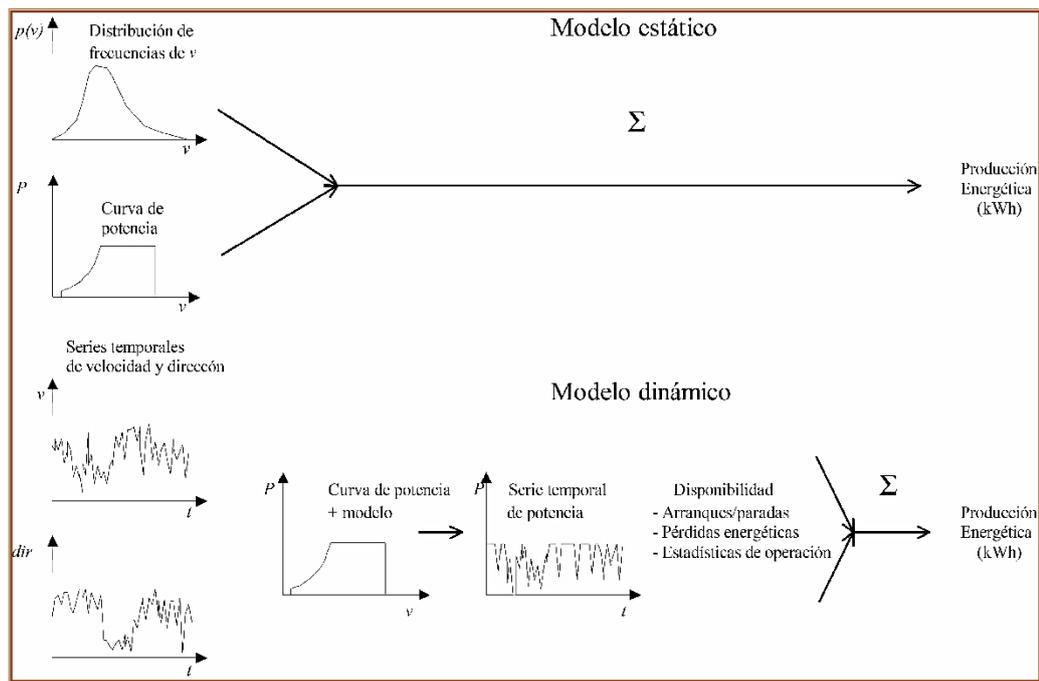


Fig. 20. Métodos de estimación de la producción energética eólica  
Fuente: La energía eólica: Principios básicos y tecnología

El resultado de un estudio de evaluación de potencial eólico suele incluir: valores medios y máximos, direcciones predominantes, distribución de frecuencias de velocidades, curva de duración, distribución direccional, turbulencia y energía disponible. La instrumentación necesaria para estos estudios consiste en un

anemómetro omnidireccional para la medida de la velocidad del viento, una veleta para medir dirección, ambos a unos 30 m de altura, un termómetro y un barómetro. La humedad ambiente y la precipitación son medidas complementarias. Los datos de velocidad se registran cada 5 a 10 segundos y se utilizan para evaluar promedios cada 10 minutos a 1 hora. Si se desea información sobre la turbulencia se ha de medir con una cadencia de al menos 1 muestra/segundo. La presión atmosférica basta medirla cada 3 horas y la temperatura cada hora. La duración de las medidas ha de ser generalmente superior al año con el objeto de reducir la incertidumbre sobre el potencial disponible en el lugar. Dado que resulta inconveniente prolongar excesivamente la campaña de medidas se toma un conjunto limitado de medidas y se hace uso de información disponible de lugares próximos (estaciones meteorológicas, aeropuertos) para mejorar la calidad de los resultados, junto con modelos numéricos de la fluidodinámica atmosférica.

### **2.2.18 POTENCIA DE UN AEROGENERADOR EÓLICO**

El comportamiento de un rotor aerodinámico viene caracterizado por los valores de tracción, par y coeficiente de potencia.

Estos valores vienen caracterizados en función del coeficiente adimensional  $\lambda$  siendo:

$$\lambda = \omega R / v$$

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].

El coeficiente de potencia  $C_p$  expresa el porcentaje de energía contenida en el viento que se transforma en energía mecánica en el eje del rotor.

Las curvas del coeficiente de potencia tienen unas formas características, se anulan para  $\lambda = 0$  y para  $\lambda_{\max}$  de operación y el valor de  $\lambda$  donde  $C_p$  alcanza su valor máximo se denomina  $\lambda_{\text{opt}}$  (valor óptimo o de diseño).

## 2.2.19 CLASIFICACIÓN DE AEROTURBINAS Y APLICACIONES

Glauert estableció el valor de la envolvente ideal de actuaciones de aeroturbinas en función de la relación de velocidades  $\lambda$ , mostrando que el coeficiente de potencia tiende asintóticamente al valor del límite de Betz 0.592 para altos valores de  $\lambda$ .

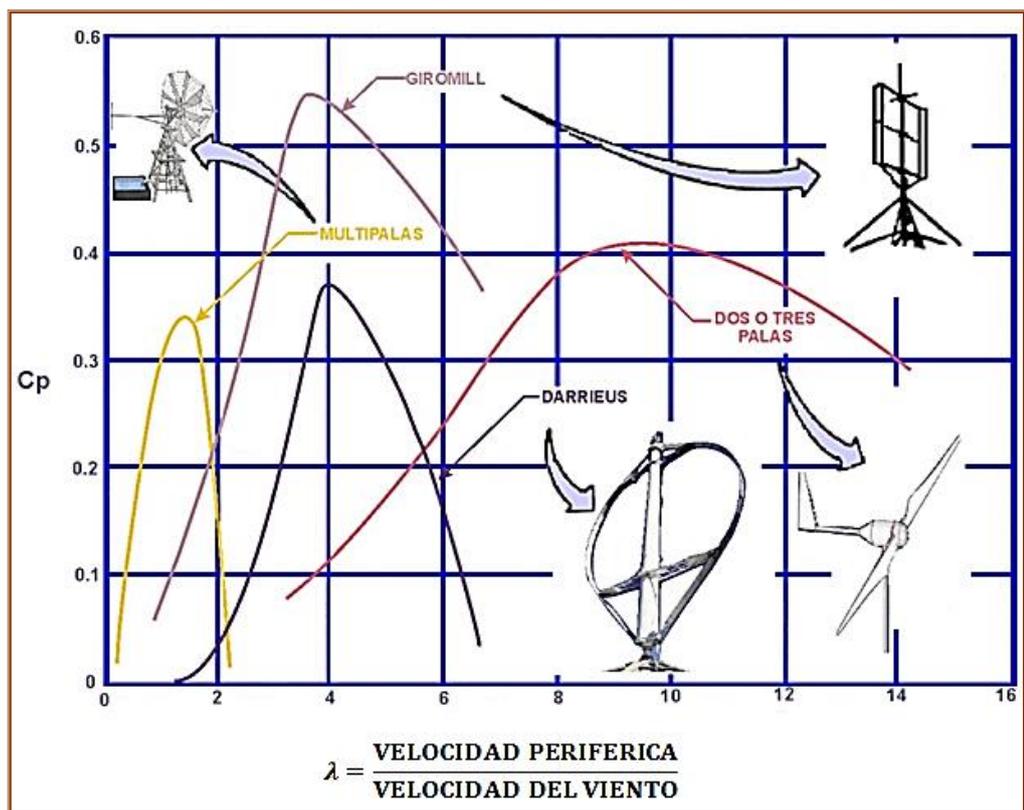


Fig. 21. Distintos tipos de aerogeneradores, fuente: internet, 2020

Dentro de este criterio de clasificación aparecen dos grupos de aeroturbinas:

- A. “Aeroturbinas lentas: rotores Savonius y multipalas, cuyo punto de diseño está alrededor de la unidad y que dejan de funcionar para valores superiores a 2” (www.energias-renovables.com, 2020).
- B. “Aeroturbinas rápidas: principalmente rotores de eje horizontal de un número reducido de palas, cuyo punto de diseño se sitúa alrededor de 8 - 10, manteniendo valores elevado de  $C_p$  es un intervalo alrededor del punto de diseño” (www.energias-renovables.com, 2020).

“En cuanto al coeficiente de par  $C_q$ , las llamadas aeroturbinas lentas presentan el máximo par de arranque a baja velocidad con un par de arranque elevado, lo que las hace muy apropiadas para aplicaciones tales como bombeo de agua. Por el contrario, las aeroturbinas rápidas tienen un par máximo a elevadas revoluciones, el par de arranque es muy pequeño incluso nulo, por lo que necesitan generalmente algún dispositivo adicional para el arranque” (www.energias-renovables.com, 2020)..

“Las aeroturbinas normalmente utilizadas para la generación de energía eléctrica o aerogeneradores son las denominadas aeroturbinas rápidas, de tres, dos e incluso una pala ya que, la potencia extraíble del viento no depende del número de palas sino de la sección barrida por ellas” (www.energias-renovables.com, 2020).

“Existen varias razones que justifican esta elección: al tener una velocidad específica más alta que las multipalas, se acoplan mejor a los generadores eléctricos existentes. Las cajas multiplicadoras son así más ligeras y ello se traduce en una disminución del coste total de la máquina” (www.energias-renovables.com, 2020).

“Últimamente, existen fabricantes que comercializan máquinas de velocidad variable y que no incluyen cajas de multiplicación debido al especial diseño de los generadores multipolos que incluyen” (www.energias-renovables.com, 2020).

Aunque el  $C_q$  de una aeroturbina es bajo, es suficiente para vencer el del generador. El  $C_q$  suele ser suficiente para hacer girar el conjunto rotor-multiplicador-generador. Otra ventaja es que cuando está parada la máquina, las cargas debidas al viento son menores que en las multipalas debido a su menor solidez.

## 2.2.20 OBTENCIÓN DE LA POTENCIA NOMINAL DE UN AEROGENERADOR EN FUNCIÓN DE SUS PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Relacionar la potencia eléctrica nominal de la maquina con los parámetros constructivos, viene dado por:

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

$$C_p = f\left(D, b, \frac{c_L}{c_D}, \lambda, AF, Re, \frac{t}{c}, \theta, v\right)$$

$$P_{aEL} = P_a P_{em}$$

Donde:

$P_a$ : potencia mecánica aprovechable de una maquina eólica, es igual a la potencia disponible por el coeficiente de potencia.

$C_p$ : coeficiente de potencia de una maquina eólica, es el resultado de dividir la potencia mecánica aprovechable por la potencia eólica disponible.

$P_{aEL}$ : la potencia eléctrica aprovechable es igual a la potencia mecánica disponible en el generador de origen eólico por las pérdidas electromecánicas.

$P_{em}$ : perdidas electromecánicas del generador eléctrico.

Si bien, se pueden encontrar relaciones entre la potencia eléctrica a la salida de un generador de corriente continua o de corriente alterna y la potencia mecánica aplicada a dicho generador,  $P_{em}$ , la mayor dificultad se encuentra en la relación entre  $C_p$  y los parámetros de diseño.

Aunque existen métodos que ligan el coeficiente de potencia de un aerogenerador con sus parámetros constructivos, desde el punto de vista práctico el camino a

seguir es el inverso: las curvas experimentales y se obtiene la energía que suministran dichos aerogeneradores.

Buscar una relación entre el  $C_p$  y los parámetros de diseño no es una tarea fácil, máxime en aerogeneradores de tamaño pequeño como es el caso de aeroturbinas de menos de 10 metros de diámetro.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 METODOLOGÍA, ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL EQUIPO Y LOS MATERIALES.**

En el presente capítulo, se realiza el diseño del aerogenerador la pequeña central de generación eólica para el poblado de TANAKA, se identificará las diferentes condiciones externas e internas a las que está sujeto durante su funcionamiento; se hará un análisis para las alternativas de los equipos y un estudio de los materiales y componentes para su selección.

La Metodología se iniciará con los estudios de clima, así como de demanda eléctrica de una comunidad rural del país, la cual se escoge para realizar un cálculo de abastecimiento energético con los componentes del sistema eólico que se seleccionará, posteriormente evaluaremos las características eléctricas del generador, considerando las características aerodinámicas de una hélice modelo, a fin de obtener la respuesta de la turbina eólica equipada con el equipo eléctrico de generación diseñado.

Conocido los resultados de los cálculos, entre los cuales está el porcentaje de la

demanda que es posible abastecer con las máquinas diseñadas, se realiza una evaluación costo beneficio, que considera el costo de construir y operar estas turbinas eólicas durante un determinado periodo de tiempo y el ahorro en consumo de petróleo Diésel, correspondiente al energético primario de un grupo electrógeno que debería entregar la energía eléctrica ahora generada en base a la energía eólica.

Con esto se concluye la factibilidad de la utilización de este tipo de turbinas como solución al abastecimiento eléctrico dentro de zonas rurales, climáticamente aptas.

### 3.1.1 UBICACIÓN DEL CENTRO POBLADO DE TANAKA

El centro poblado de Tanaka se sitúa, en el distrito de Yauca, en la provincia de Caraveli, dentro del departamento de Arequipa.



Fig. 22. Ubicación de la localidad de Tanaka en el departamento Arequipa, fuente: google maps



Fig. 23. Localización de Tanaca, en el distrito de Yauca, fuente: google maps

### **3.2 CONDICIONES EXTERNAS A LAS QUE ESTÁ SUJETO LA PEQUEÑA CENTRAL DE GENERACIÓN EÓLICA**

Las condiciones externas son aquellas que tienen relación indirecta con la pequeña central de generación eólica y su fabricación; entre ellas tenemos condiciones climáticas variables, los obstáculos que rodean al aerogenerador, rugosidad del terreno, la velocidad promedio del viento de acuerdo a los días del año, y diferentes horas del día; todos estos elementos influyen para realizar el diseño adecuado del equipo.

DEPARTAMENTO	POTENCIAL EÓLICO APROVECHABLE (MW)	POTENCIAL EÓLICO EXCLUÍDO (MW)	POTENCIAL EÓLICO TOTAL (MW)
Amazonas	129	288	417
Ancash	708	108	816
Apurímac	0	0	0
Arequipa	1020	156	1176
Ayacucho	0	0	0
Cajamarca	891	282	1173
Callao	0	0	0
Cuzco	0	0	0
Huancavelica	0	0	0
Huánuco	0	0	0
Ica	2280	3015	5295
Junín	0	0	0
La Libertad	921	264	1185
Lambayeque	7017	2097	9114
Lima	429	189	618
Loreto	0	0	0
Madre de Dios	0	0	0
Moquegua	0	0	0
Pasco	0	0	0
Piura	7098	1503	8601
Puno	0	0	0
San Martín	0	0	0
Tacna	0	0	0
Tumbes	0	0	0
Ucayali	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>20493</b>	<b>7902</b>	<b>28395</b>

Fig. 24. Potencial eólico aprovechable en los departamentos del Perú, fuente atlas eólico del Perú

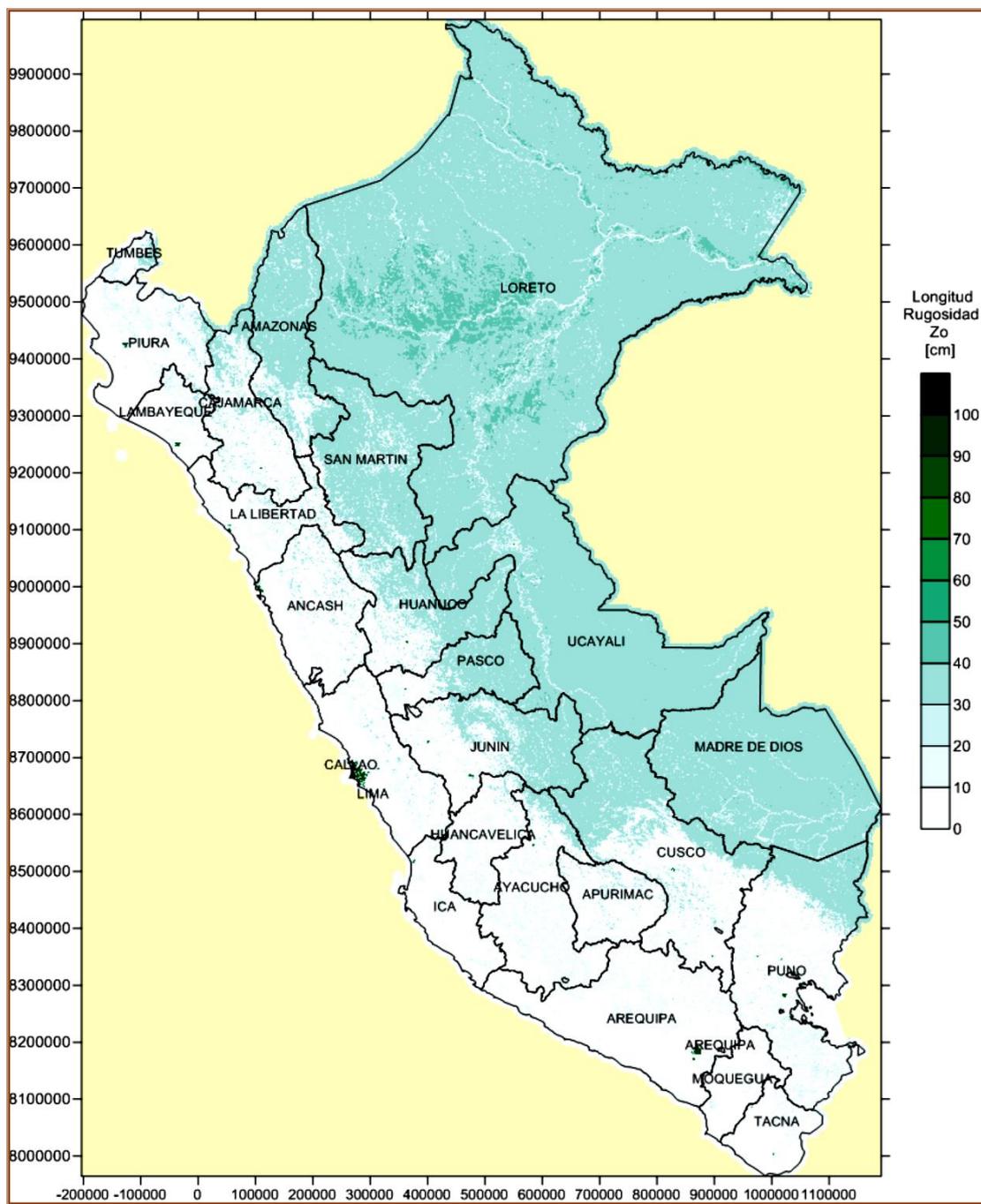


Fig. 25. Rugosidad del territorio peruano, fuente: atlas eólico del Perú

### 3.2.1 CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales son tomadas del lugar en donde se van a realizar las pruebas del generador eólico. Para nuestro proyecto la localidad tomada es en **TANAKA - YAUCA** en donde se realizó la investigación de las condiciones ambientales.

De acuerdo al atlas eólico del Perú (2016), publicado por el ministerio de energía y minas en el año 2016, podemos ver que la localidad de Tanaka, goza de vientos muy fuertes, superiores a 10 m/s.

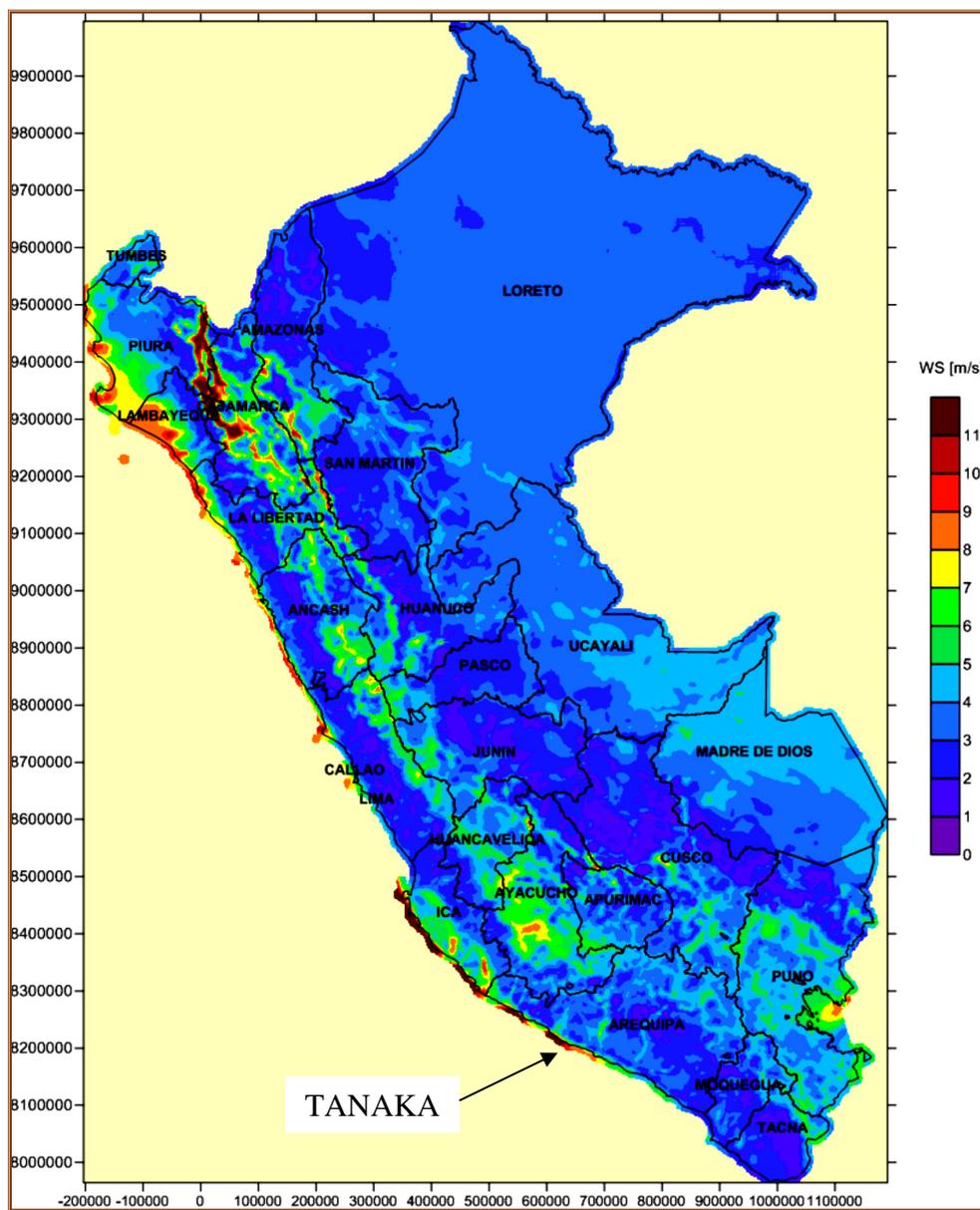


Fig. 26. Velocidad del viento en zonas geográficas en el Perú

### 3.3 CONDICIONES INTERNAS A LAS QUE ESTÁ SUJETO EL GENERADOR EÓLICO

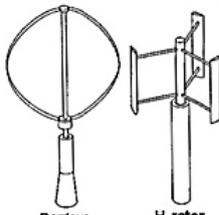
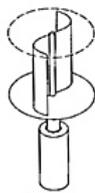
Las condiciones internas, son aquellas que están relacionadas con la máquina y,

determinan sus materiales y el tipo de construcción; estas condiciones son: **el diseño de las palas, sistema de transmisión de la potencia mecánica, generador eléctrico, batería de almacenamiento, controladores y cableado.**

### 3.3.1 ALTERNATIVAS PARA LAS ASPAS Y EL ROTOR

Como necesitamos generar 8 KW (fuente SEAL, 2016), de potencia no es necesario un aerogenerador de mucha potencia, por lo tanto, veremos cual los diseños podemos escoger para la localidad de TANAKA, según la potencia que generan los distintos aerogeneradores.

Porque, según los tipos de aerogeneradores estudiados en el capítulo II de este trabajo de investigación, los aerogeneradores de tipo vertical, tienen el coeficiente de potencia relativamente bajo, por ese motivo, su producción de energía es baja, tal como lo podemos apreciar en el siguiente gráfico:

	Eje Horizontal	Eje Vertical Sustentación	Eje Vertical Arrastre
		 Darrieus      H-rotor	 Savonius
<b>Ventajas</b>	Eficiente Ampliamente probado Muy utilizado Más económico Muchos modelos	Eficiencia aceptable Indiferente a la dirección del viento Menos sensibilidad a turbulencia Crea pocas vibraciones	Producto probado Silencioso Robusto y fiable Indiferente a la dirección del viento Puede aprovechar flujos turbulentos Crea pocas vibraciones
<b>Desventajas</b>	No soporta adecuadamente cambios frecuentes en la dirección del viento No tolera bien vientos racheados	No muy probado Más sensible a la turbulencia que el Savonius	Baja eficiencia Económicamente costoso

(Fuente: Randall 2003, Timmers 2001, and Clear Skies 2003)

Fig. 27. Tipos de aerogeneradores de poca potencia, fuente: internet 2020

En el siguiente grafico podemos apreciar, como los aerogeneradores de tipo vertical, son más usados, para potencias relativamente bajas.

También otro punto, importante, es que no sabemos, la dirección de los vientos, ya que no contamos con una rosa de los vientos en Tanaka. Por eso elegiremos

aerogeneradores de tipo vertical, ya que estos son más versátiles y aprovechan el viento, pero de diferentes direcciones.

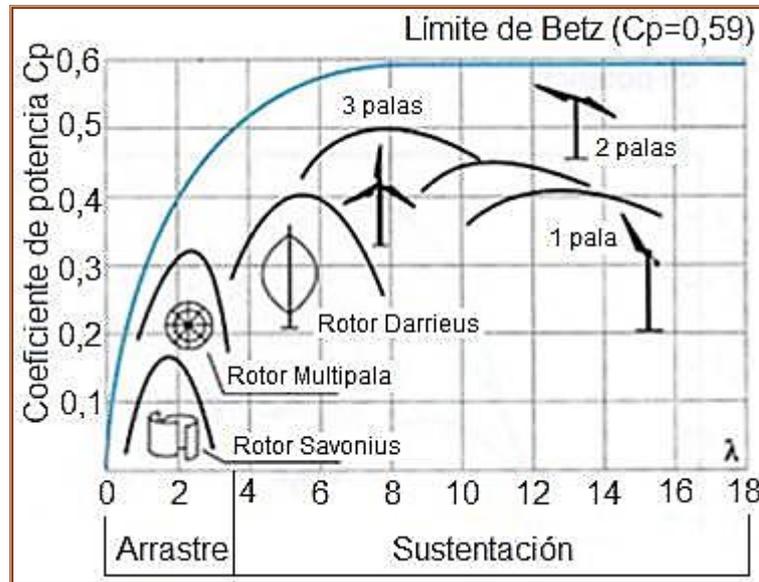


Fig. 28. Coeficiente de potencia de los aerogeneradores, fuente: internet 2020

De acuerdo, al gráfico anterior, tenemos varias opciones, tal como: aerogenerador savonius, aerogeneradores darrieus, o generadores multipalas.

Podemos elegir, el generador darrieus, que es un buen generador, pero su confección es muy costosa.

Elegiremos el aerogenerador savonius (o una variante de este), ya que es un generador, relativamente fácil de fabricar.

Tomaremos de referencia, el diseño de fabricación hecho por ARBELOA, Lorena, ZURITA Jesús, en su tesis titulada: “Diseño De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Savonius Para Electrificación Rural”, en el cual ha diseñado un aerogenerador que tiene las siguientes características: “consta de dos palas unidas a dos tapas circulares, las dos palas están soportadas por la tapa inferior y en la parte superior se unen a la tapa superior; unido todo entre sí durante la fabricación de cada una de sus partes; siendo lo más importante que se debe considerar es el peso del rotor; el material de las palas o aspas” recomiendan un material económico, pero que sea

resistente al torque generado por la fuerza del viento.

A continuación, en la figura 29 vemos, diseños de diferentes perfiles seccionales de algunos rotores de eje vertical.

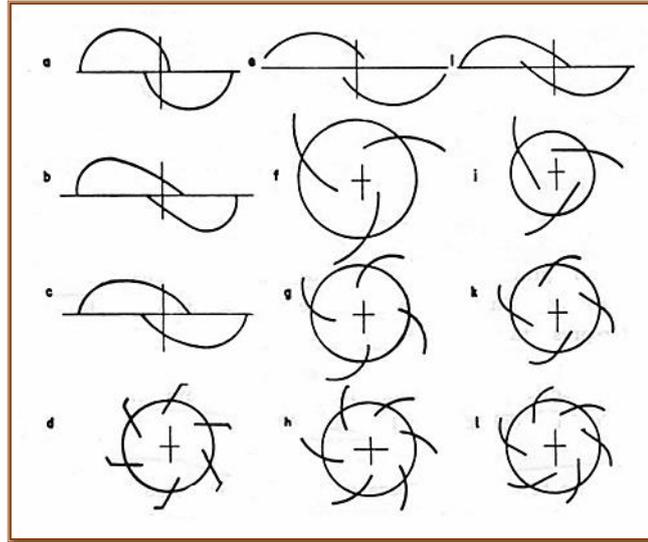


Fig. 29. Perfiles seccionales de algunos rotores de eje vertical, fuente: internet 2020

### 3.3.2 DISEÑO DE LAS ASPAS

De acuerdo a las condiciones internas y externas, se ha realizado un estudio para la determinación de la forma de las palas, siempre tomando de referencia el trabajo realizado por el ingeniero: Luis Vinicio Cueva Barrazueta en su tesis titulada: “diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 watts”.

De igual manera para las dimensiones del rotor, hemos estudiado la velocidad de rotación para producir fuerza del viento y la fuerza producida en las palas, tomando de referencia el trabajo realizado por Luis Vinicio Cueva Barrazueta en su tesis titulada: “diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 watts”.

#### 3.3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA FORMA DE LAS ASPAS

Luis Vinicio Cueva Barrazueta en su tesis titulada: “diseño y construcción de un

generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 watts”, recomienda que, para este caso en particular, en la localidad de Tanaka, se diseñe el aerogenerador tipo savonius, con la variante formada “por un conjunto de aspas que se forman cortando un cilindro en el sentido longitudinal a la mitad y luego desplazando las dos superficies cilíndricas a lo largo del plano de corte, de tal manera que el corte se parezca a la letra S”, esto se aprecia en la figura 30.

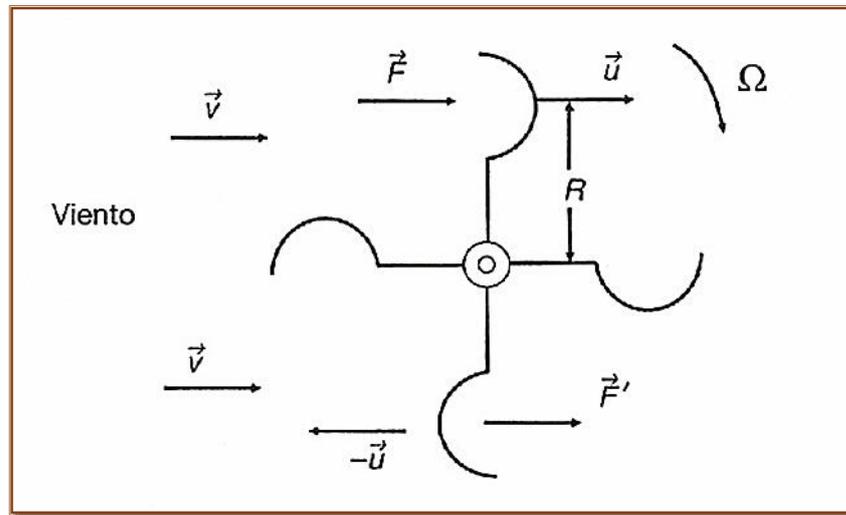


Fig. 30. Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial, fuente: internet 2020

### 3.3.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL ROTOR

Primero partiremos de la premisa que necesitamos 8 kW de potencia de consumo, por lo que veremos de cuanta potencia de generación estamos hablando:

**Datos:**

$$P_s = C_p P_c$$

DESCRIPCIÓN	VALORES
Potencia suministrada (Ps)	8 kW

Coefficiente de potencia (Cp) de un generador savonius en promedio	0.20
<b>Potencia cinética del viento(Pc)</b>	<b>40 kW</b>

El dimensionamiento del rotor, debe hacerse conforme a la velocidad del viento en el lugar de pruebas y funcionamiento del aerogenerador; también es importante conocer la potencia que se desea obtener para el funcionamiento de la máquina.

Según Lorena Arbeloa Sola y Jesús Zurita Gabasa Pamplona, en su tesis “Diseño De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Savonius Para Electrificación Rural” mencionan que, si se coloca un apantallamiento, direccionado mediante un sistema de timón-veleta, el coeficiente de potencia aumentaba considerablemente, por lo tanto, la potencia cinética del viento viene dada por la formula siguiente:

$$Pc = 0.341 \frac{1}{2} \rho v^3 A$$

Donde:

A= área del motor eólico

V= velocidad del viento en (m/s); 10 m/s (de fig 26)

$\rho$ = densidad del aire (1.2 kg/m<sup>3</sup> en la costa peruana, según INACAL)

P= potencia cinética del viento en (W):

Por lo tanto, tenemos, para la localidad de Tanaka, los siguientes datos:

DESCRIPCIÓN	VALORES
Velocidad del viento en (m/s)	10
$\rho$ = densidad del área (en kg/m <sup>3</sup> )	1.2

Potencia cinética del viento (Pc) en W	40000
<b>Área del motor eólico (A) (m<sup>2</sup>)</b>	<b>195.50</b>

Vemos que el área de motor eólico (A), es de 195.50 m<sup>2</sup>.

Sabemos que el área de un círculo es:

$$A = \pi r^2$$

Donde:

DESCRIPCIÓN	VALORES
Área del motor eólico (A)	195.50
<b>Radio del círculo del motor eólico</b>	<b>7.90</b>

Podemos ver que necesitamos un aerogenerador de 8 metros de radio, como mínimo para generar los 8 kW de potencia requeridos para la localidad de Tanaka.

El apantallamiento del rotor savonius tendrá por objeto el minimizar o anular en si la fuerza de reacción que se origina, debido a la fuerza de acción del viento al chocar con las palas del aerogenerador y quedará la forma del rotor de la siguiente manera:

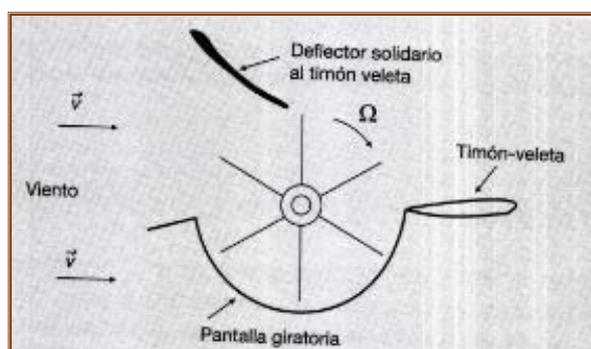


Fig. 31. Rotor con apantallamiento para mejorar su desempeño, fuente: Energía eólica, Miguel Villarrubia

### 3.3.2.3 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Es la velocidad a la que deba girar el generador eólico para obtener la potencia máxima que se puede extraer del viento, que es la potencia máxima de diseño.

$$\gamma = \omega R/v$$

Donde:

$\gamma$ : 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 (Pico-saltos, et al, 2018). La velocidad de diseño y el radio del rotor ya se han calculado con anterioridad, por lo que reemplazando en la formula anterior con los datos para el aerogenerador:

DESCRIPCIÓN	VALORES
velocidad específica ( $\gamma$ ) en m/s	0.8
radio del rotor del aerogenerador [m]	7.9
velocidad de diseño del viento [m/s]	10.0
<b>velocidad angular [rd/s].</b>	<b>1.01</b>

El resultado está en radianes por segundo por lo que debemos convertirlo a revoluciones por minuto, por lo que procederemos a hacer una conversión:

$$\omega = 2\pi n/60$$

$$n = 9.64 \text{ rpm}$$

La velocidad a la que deberá rotar el aerogenerador, será de 9.64 rpm, esto es una velocidad no muy alta, pero es suficiente para producir tal cantidad de energía.

### 3.3.2.4 FUERZA PRODUCIDA EN LAS ASPAS DEBIDO A LA ROTACIÓN

Es una fuerza que se producirá cuando el rotor esté girando, esta fuerza aumenta mientras aumenta el radio de rotación, es decir será más fuerte en el extremo de las aspas, y se la determina:

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

Donde

m: masa del cuerpo (kg)= $\rho V$ .

$\omega$ : velocidad de rotación del cuerpo en (rd/s).

R: radio de rotación (m).

$\rho$ : densidad del material de las aspas de rotación (Kg/m<sup>3</sup>).

V: volumen de las aspas de rotación (m<sup>3</sup>).

DESCRIPCIÓN	VALORES
Masa del cuerpo (kg)	$\rho V$
Velocidad de rotación del cuerpo (rad/s)	1.01
Radio de rotación (m)	7.9
<b>Fuerza en las aspas de rotación (N)</b>	<b>7.98pV</b>

La fuerza en las aspas de rotación, será expresado en términos de la densidad del material que se usará en la construcción del rotor savonius (puede ser de aluminio, polietileno de alta densidad, etc) así como el volumen que tendrá el rotor del motor savonius, dependerá de la altura que tendrá el rotor.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 RESULTADOS, TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

##### 4.1.1 RESULTADOS, ANÁLISIS DEL AEROGENERADOR EÓLICO

En el presente capítulo, se estudia y se discute los resultados de diseñar un aerogenerador, tratando de detallar de manera teórica que variables afectan a su diseño.

##### 4.1.2 CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La capacidad de generación de energía eléctrica, se ve afectada por el medioambiente en el lugar de instalación para las pruebas del aerogenerador, en la localidad de Tanaka; podemos nombrar los más importantes, **tales como velocidad del viento, así como rugosidad del terreno.**

##### 4.1.3 DEFINICIÓN DEL LUGAR DE PRUEBAS DEL AEROGENERADOR

Para realizar un análisis real de nuestro aerogenerador, tanto el teórico, realizado en este proyecto, así como el real, se debe conocer el lugar exacto del lugar en donde se realizan las pruebas; este cumple con varias características que son importantes a la hora de determinar cómo afecta el viento al lugar y en cómo se ve afectada la capacidad de generación de energía, el análisis teórico permite tener un

mejor aprendizaje y selección del lugar idóneo para la instalación de generadores eólicos.

#### **4.1.4 RUGOSIDAD PRODUCIDA POR EL SECTOR**

La altura del lugar de la instalación del **generador eólico varía desde 6 a 10 metros sobre el nivel del suelo**, en el lugar de pruebas del generador eólico existe gran variación de la velocidad del viento y rugosidad para la obtención de valores obtenidos.

#### **4.1.5 CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA MÁXIMA TEÓRICA**

La capacidad de generación de energía máxima teórica es de 8000 Watts, cuando la velocidad del viento sea de 10 m/s, cuando suceda esto el generador estará girando a 10 rpm, según lo encontrado en las formulas teóricas.

## **4.2 CONCLUSIONES**

Como se desprende del presente trabajo de investigación, se puede observar que se ha podido diseñar un modelo de aerogenerador basado en una variante del modelo savonius.

También podemos concluir que la generación de energía eléctrica basada, en este modelo de aerogenerador, es factible, ya que se hicieron los cálculos matemáticos tomando en cuenta, el área del rotor del generador, así como la velocidad del viento en Tanaka.

En nuestros cálculos iniciales, vemos que necesitamos, un rotor de dimensiones bastante grandes (7.9 metros de radio), para generar 8 kW de potencia, pero esta dimensión puede reducirse en gran medida, una vez que se ensamble el aerogenerador, ya que el generador eólico necesita una caja de transmisión de energía, esta caja bien podría multiplicar la potencia que se genera, y de esta manera reducir en forma considerable el tamaño del aerogenerador.

El generador eólico de eje vertical propuesto requiere una construcción más simple en comparación a los diferentes tipos de generadores eólicos de eje horizontal, por esta razón se recomienda usar materiales simples y que no tenga demasiada masa tal podría ser el acrílico que permite ligereza y resistencia para su construcción, funcionamiento y mantenimiento.

La falta de tecnología y de materiales en el país, conlleva a que todo tipo de diseño de máquinas y mecanismos se adecúe a esta escasez de productos, es nuestro trabajo como ingenieros electricistas, encontrar vías de desarrollo y soluciones a dicho problema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARBELOA, Lorena, ZURITA Jesús, *Diseño De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Savonius Para Electrificación Rural*. Tesis (ingeniería industrial). Pamplona: Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales Y De Telecomunicación, 2012, 169 pp.
2. CANEDO, Walter, *Diagnóstico Del Sector Energético En El Área Rural De Bolivia*. [en línea] [fecha de consulta: 06 de junio del 2020]. Disponible en: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0002.pdf>.
3. CUEVA, Luis, *Diseño Y Construcción De Un Generador Eólico De Eje Vertical Tipo Savonius Para Producir 20 Watts*. Tesis (ingeniería mecánica). Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2015, 129pp.
4. ENERGÍA EÓLICA EN ALICANTE, ©2020, [consulta: 18 junio 2020]. Disponible en: <http://www.energy-spain.com/energia-eolica/> Catálogo aerogenerador AW-3000
5. ENERGÍA EÓLICA, ©2020, [consulta: 20 junio 2020]. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/energia/turbinas>.
6. FERNÁNDEZ, Miguel, *Rol E Impacto Socioeconómico De Las Energías Renovables En El Área Rural De Bolivia*, 1ª. ed. CEDLA: La paz, 2010. 84 pp. ISBN 978-99954-786-3-6.
7. FERNÁNDEZ, Pedro, *Energía Eólica*, 1ª. ed. Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T: España, 1993, 25 pp, ISBN 84-8102-019-2.
8. RIELLO SOLAR TECH, ©2020, [consulta: 20 junio 2020]. Disponible en: <http://www.energias-renovables.com>.
9. VILLARRUBIA, Miguel, *Energía Eólica*, 1ª. Ed. Grupo Planeta (GBS), 2004, 322 pp, ISBN 84-329-1062-7.
10. Pico-Saltos, Gabriel, et al. *Turbinas Hidrocinéticas De Eje Vertical Helicoidal*, Roca. Revista científico - educacional de la provincia Granma, Quito, 2018, ISSN: 2074-0735.